



MÀSTER UNIVERSITARI TECNOLOGIA A L'ARQUITECTURA
DISSENY I ANÀLISI D'ESTRUCTURES ARQUITECTÒNIQUES
PROJECTE FINAL DE MÀSTER - Curs 2010/11

APLICACIONS DE "FRFA" (formigó reforçat amb fibres d'acer) AMB
FUNCIÓ ESTRUCTURAL A OBRES D'EDIFICACIÓ. ESTUDI D'APLICACIÓ, A
TENSIONS NORMALS, EN FORJATS SANDVITX BIDIRECCIONALS.

ALUMNE:

Damián NAVARRO AROCA

TUTORS:

David GARCÍA

Jordi PAYOLA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

ÍNDEX

0- RESUM/ABSTRAT

1- DEFINICIÓ BÀSICA

- 1.1- INTRODUCCIÓ
- 1.2- MOTIVACIÓ

2- OBJECTE DE L'ESTUDI

3- OBJECTIUS

- 3.1- OBJECTIUS GENERALS
- 3.2- OBJECTIUS ESPECÍFICS
- 3.3- ABAST I LÍMITS

4- ESTAT DE L'ART

- 4.1- LES FIBRES D'ACER
- 4.2- POSTA EN OBRA DEL FRFA, INFLUÈNCIA DEL FORMIGONAT I EL PROCÉS DE VIBRACIÓ EN L'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES.
- 4.3- EQUACIONS CONSTITUTIVES DEL MATERIAL I ELS COEFICIENTS DE SEGURETAT DEL MATERIAL.
- 4.4- METODOLOGIA DE CàLCUL: ANÀLISI ELÀSTIC I ANÀLISI PLÀSTIC.
- 4.5- CàLCUL EN SITUACIÓ LÍMIT DE SERVEI I SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA.
- 4.6- EXEMPLES D'APLICACIONS DE HRFA AMB FUNCIO ESTRUCTURAL.

5- VIABILITAT DE L'ESTUDI

- 5.1- COMPARACIÓ COMPORTAMENT ELÀSTIC I PLÀSTIC ENTRE LLOSA MASSISSA I FORJAT SANDVITX.
- 5.2- VIABILITAT DE L'ESTUDI. DESCRIPCIÓ DE LES FONTS A UTILITZAR.

6- CONCLUSIONS PRELIMINARS

- 6.1- VERIFICACIÓ DE L'OBJECTIU.
- 6.2- CONCLUSIONS INTUÏDES.

7- BIBLIOGRAFIA PRELIMINAR

- 7.1- BIBLIOGRAFIA GENERAL.
- 7.2- BIBLIOGRAFIA ESPECIFICA.
 - 7.2.1- NORMATIVES.
 - 7.2.2- ARTICLES.
 - 7.2.3- TESIS DOCTORALS I TREBALLS DE RECERCA.
 - 7.2.4- ALTRES.

0. RESUM/ABSTRAT.

Els formigons amb fibres s'han fet servir per a diverses aplicacions que es podrien denominar menors, principalment en paviments i formigons projectats. No obstant, als darrers anys s'està desenvolupant l'ús del formigó reforçat amb fibres d'acer per aplicacions amb funció estructural, ja sigui per a elements prefabricats com per a elements formigonats "in situ". Donat els grans avantatges que suposa que l'acer de reforç estigui barrejat amb el formigó, que com principal factor té la simplificació de la seva posta en obra, fa recomanable aprofundir en aquest camp d'investigació per tal de desenvolupar sistemes constructius, tipologies estructurals i mètodes de càlcul que facin més fàcil l'aplicació de FRFA en elements estructurals amb arguments suficients (competitivitat, seguretat, posta en obra...) cara als projectistes, constructors i promotors.

En obres d'edificació, en aquesta línia, hi ha dos clars exemples de l'aplicació del HRFA per a forjats resolts amb llosa massissa per a llums de fins a 8,00 m. Els quals presenten uns clars avantatges respecte a la llosa de formigó armat convencional.

El mercat de l'edificació tendeix a aconseguir estructures cada cop amb les llums més grans per tal de donar més flexibilitat als espais, difícilment assumible amb tipologies de forjat de llosa massissa. Per la qual cosa, per tal que l'aplicació del HRFA en forjats d'edificació pugui ser una alternativa real al formigó amb armadura passiva convencional, es fa necessari estudiar altres tipologies de forjat on el FRFA sigui aplicable per aconseguir un rang de llums superior als 8,00 m.

Aquest treball estudia la viabilitat d'aplicar el FRFA a la tipologia de forjat Sandvitx, ja que representa un forjat més lleuger i millora l'aprofitament del material. L'estudi es centrarà en les tensions normals produïdes per els esforços flectors, ja que son els determinants per al dimensionat de la secció i la resistència del material. Es fa la comparació dels resultats de les capacitats resistents de les seccions en regim elàstic i regim plàstic tant de llosa massissa com forjat sandvitx.

1. DEFINICIÓ BÀSICA.

1.1 INTRODUCCIÓ.

L'addició de fibres dintre d'una matriu per tal de millorar o aportar noves característiques a un material no és una cosa recent, exemple d'això és el maó de tova i palla utilitzat a l'antiguitat o per exemple la barreja de guix i fibres d'espart, o més recentment els materials compostos de fibres i matrius de resines, com podem ser els perfils pultrusionats.



Fig. 1.1 Maó de tova. [1]



Fig. 1.2 Guix i espart. [1]



Fig. 1.3 Perfil pultrusionat, Fibres i resines. [1]

Del que es tracta bàsicament és millorar el comportament d'un material amb la barreja d'altra material que porti les propietats que es volem millorar. Com per exemple a la tova, a la capacitat de compressió se li afegeix les fibres de palla per contrarestar el comportament fràgil del material o per exemple als perfils pultrusionats de fibres amb matriu de resina, a l'alta resistència a tracció de les fibres se li afegeix una matriu que aporta estabilitat dimensional, sobretot sota sol·licitacions de compressió.

Pel que fa el formigó reforçat amb fibres, les primeres aplicacions van ser en paviments i soleres, per l'alt control de retracció i fissuració i la millora de la resistència a l'abradió i al impacte, juntament amb una fàcil posta en obra del material. Fruit d'això són les soleres continues sense juntes on hi ha un alt grau de transit pesat, com podem ser paviments industrials, pistes d'aeroports o molls de ports.



Fig. 1.4 Paviment de nau industrial. [1]



Fig. 1.5 Paviment de moll de càrrega de mercaderies. [2]



Fig. 1.6 Paviment d'aeroport. [2]

Però es relativament recent la investigació sobre el FRFA amb funcions estructurals. Tenint el seu camp d'aplicació força ampli: estabilització de talussos i túnels amb formigó projectat, peces prefabricades (tubs, panells, arquetes, dovelles per a túnels...), rehabilitació de forjats, fonamentacions directes i murs de contenció, forjats amb lloses massisses... Però cal aprofundir encara més en el desenvolupament d'aquest nou material amb funció estructural per tal de donar garanties suficients per a que el seu ús sigui més extens.

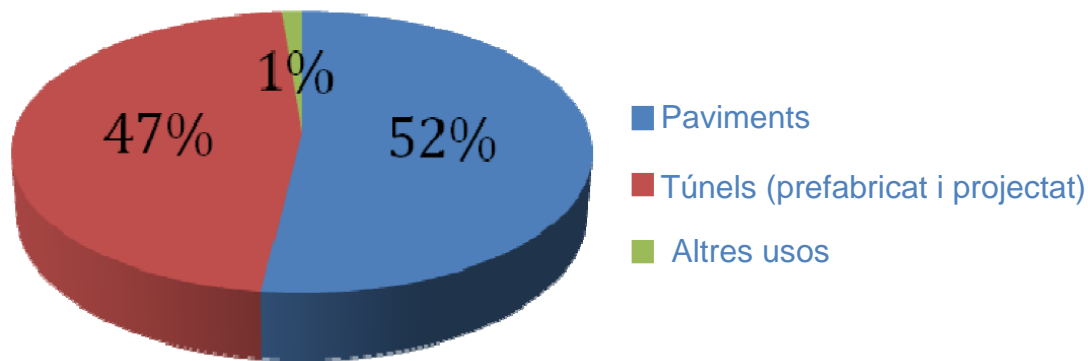


Fig. 1.7 Gràfic aplicació de formigó reforçat amb fibres a Espanya. [2]

REFERÈNCIES:

[1] Imatges extretes d'Internet.

[2] A. Aguado, Formigó armat amb fibres metàl·liques: disseny, càlcul i aplicació.

1.2 MOTIVACIÓ.

Des de fa temps s'està investigant sobre el formigó reforçat amb fibres per a elements no estructurals, però recentment, s'està aprofundint en l'aplicació en elements estructurals, tant prefabricats com formigonat "in situ". Donat els grans avantatges que suposa que l'acer de reforç estigui barrejat amb el formigó, que com principal factor té la simplificació de la seva posta en obra, fa recomanable aprofundir en aquest camp d'investigació per tal de desenvolupar sistemes constructius, tipologies estructurals i mètodes de càlcul que facin més fàcil l'aplicació de HFRA en elements estructurals, amb arguments suficients (competitivitat, seguretat, posada en obra...) cara als projectistes, constructors i promotors.

2. OBJECTE DE L'ESTUDI.

En aquest treball s'estudia la viabilitat tècnica de l'aplicació de FRFA en elements estructurals formigonats "in situ" per a obres d'edificació. En concret es centra en forjats bidireccionals, donat que s'han fet assajos a escala 1:1 per a lloses de formigó de FRFA, amb resultats satisfactoris.

L'estudi avalua l'optimització del material en funció de tipologies estructurals més adients per la seva aplicació y els mètodes de càlculs segons les característiques mecàniques del material que permetin optimitzar al màxim la seva aplicació.

L'estudi es centrarà en les **tensions normals produïdes per els esforços flectors sobre les seccions de llosa massissa i de forjat sandvitx**, donat que aquest esforços son els determinants a l'hora de dimensionar la secció. A priori s'intueix que la tipologia de forjat sandvitx bidireccional permetrà optimitzar l'ús del material per a llums mitjanes. Per a llums petites, els assajos realitzats ja han demostrat que l'aplicació de FRFA amb lloses massisses és molt avantatjosa, no obstant, per a llums superiors a 8 m, la seva aplicació en tipologia de llosa comença a presentar inconvenients.

3. OBJECTIUS.

3.1 OBJECTIUS GENERALS.

El formigó reforçat amb fibres d'acer (FRFA), constitueix una de les innovacions més rellevants al camp dels formigons especials. El FRFA s'ha d'entendre com un formigó que inclou en la seva composició fibres curtes i discretes, distribuïdes aleatòriament a la seva massa. Un cop el formigó ha fissurat, la pèrdua d'adherència i arrencament de les fibres dissipa una major energia, la qual cosa condueix a un important increment de la tenacitat, en contraposició del comportament fràgil del formigó en massa.

Actualment són cada vegada més les aplicacions en les quals s'utilitza aquesta tecnologia amb responsabilitat estructural. No obstant el camí per recorre per a un ús normalitzat del FRFA com a material estructural és important i llarg, doncs existeixen aspectes que dificulten la seva utilització, com són: la falta d'experiència i la inèrcia del sector de la construcció que dificulta la introducció de noves tecnologies fins que no han sigut clarament contrastades en aplicacions anteriors.

L'objectiu general d'aquest treball és estudiar la viabilitat tècnica de l'aplicació del FRFA per a forjats d'edificació amb tipologia de forjat sandvitx.

3.2 OBJECTIUS ESPECÍFICS.

Amb l'estudi de la viabilitat d'aplicar el FRFA en tipologia de forjat sandvitx es vol demostrar que suposa una sèrie d'avantatges respecte la seva aplicació en llosa massissa:

- S'aconsegueixen forjats més lleugers per a una mateixa capacitat resistent.
- S'aconsegueix optimitzar l'ús del material, reduint quantia de formigó i d'acer.
- Permet augmentar el rang d'aplicació del FRFA en forjats per sobre dels 8,00 m de llum.

3.3 ABAST I LÍMITS.

Com ja s'ha indicat abans, l'estudi es centrarà en les **tensions normals en l'aplicació de HRFA en forjats sandvitx**, concretament es centrarà en esforços i tensions produïdes per Moments flectors perpendiculars a la secció del forjat, donat que aquest són els determinants per al dimensionament de la secció de formigó i la quantia d'acer.

En aquest estudi s'analitzarà la capacitat resistent de seccions de lloses massisses i alleugerides amb cassetons de poliestirè, tant en regim elàstic com en regim plàstic, comparant els avantatges i inconvenients entre una tipologia i una altra.

En primera instància, es fàcilment deduïble que, donat el procés constructiu d'un forjat sandvitx amb formigonat en dues fases, existirà un problema important d'esforç rasant a la junta entre formigonats. Aquest aspecte és un punt important que s'haurà de solucionar si es vol materialitzar la construcció d'un forjat sandvitx de HRFA.

L'abast d'aquest estudi es centrarà en les tensions normals a la que estarà sotmesa la secció del forjat, sense considerar l'esforç rasant que es produirà en la junta de formigonat.

4. ESTAT DE L'ART.

El formigó reforçat amb fibres (HRF), tal i com el coneixem actualment apareix al voltant dels anys 40, però no és fins la dècada dels 60 quan el seu ús és més generalitzat.

El FRF s'ha d'entendre com un formigó que inclou en la seva composició fibres curtes i discretes, distribuïdes aleatòriament a la seva massa, les quals aporten a la matriu de formigó una millora del comportament del material en certs aspectes:

- Millora de la resistència a la **flexotracció**.
- Millora de la resistència a **tracció**.
- Millora la resistència a **tallant**.
- Millora la **ductilitat** (el formigó en massa té un trencament fràgil).
- Millora de la resistència a **fatiga**.
- Millora de la resistència al **impacte**.
- Millora de la resistència a l'**abrasió**.
- Major control de la **fissuració**.
- Millora la **durabilitat** del formigó.
- Disminució de la **fluència**.

Per a l'estudi del formigó reforçat amb fibres amb **funció estructural** ens fixarem en la millora de les propietats de resistència a la **flexotracció**, resistència a la **tracció**, resistència a **tallant**, del augment de la **ductilitat** i a la disminució de **fluència**.

Actualment les fibres utilitzades per al reforç de formigó tenen un origen divers: fibres de vidre, fibres metàl·liques, fibres sintètiques, fibres orgàniques i fibres naturals, a continuació s'adjunta un quadre de les característiques dels diferents tipus de fibres.

Tipus de fibra	Resistència a tracció (N/mm ²)	Modul d'elasticitat (KN/mm ²)	Densitat (Kg/m ³)	Allargament de trencament (%)
Acer	500-3.000	210	7.800	3,5
Acer inoxidable	2.100	160	7.860	3
Vidre	2.000	60	2.700	3,6
Carboni	3.000	200-500	1.900	0,5
Asbest	900	200	2.600	2,0-3,0
Niló	78	4	1.100	13,0-15,0
Polipropilè	40-80	5-25	900	8,0-20,0
Poliester	70-90	8,2	1.400	11,0-13,0
Kevlar 49	2.900	133	1.500	2,6
Kevlar 29	2.900	69	1.500	4,0
Sisal	40-80	30	1.200	3,0
Formigó	4-8	30	2.300	3,0

Fig. 4.1 Quadre de característiques de materials de les fibres.

Donat que un dels principals factors a tenir en compte a l'hora d'escollir el tipus de material més adient per a reforç de formigó amb funcions estructurals, és la **compatibilitat de deformacions entre formigó i reforç**, s'hauran de fer servir materials amb una **alta resistència a tracció i un mòdul d'elasticitat alt**, donat que grans deformacions del material de reforç es traduiria en un alt nivell de fissuració del formigó.

Entre els materials de la taula anterior, els més idonis serien l'**acer** (amb alt límit elàstic) i el **carboni**. Però per raons econòmiques les fibres més utilitzades són les d'acer, deixant les fibres de carboni per aplicacions especials.

4.1 LES FIBRES D'ACER.

El tipus d'acer utilitzat és d'**alta resistència, des de els 900 als 2.000 N/mm²**
Segons el **procediment de fabricació**, es podem distingir quatre grups:

- Obtingudes per **trefilat** en fred.
- Obtingudes per **tall de xapes**.
- Extracció en calent mitjançant **rascat** de blocs d'acer.
- Obtingues per **altres procediments**.

L'**adherència** entre el formigó i les fibres és un dels factors més importants que influeix en les propietats de HRFA, de manera que els diferents fabricants han ideat formes que milloren l'adherència , com pot ser la conformació dels extrems, ondulacions, fibres dentades, eixamplaments dels extrems...



Fig. 4.1.1 Tipologies de fibres d'acer. [3]

L'ESVELTESA DE LA FIBRA.

El conformat de les fibres per augmentar l'adherència permet reduir considerablement la longitud d'ancoratge d'aquestes, reduint per tant l'**esveltesa de les fibres (l/d)**.

L'esveltesa de la fibra és un dels paràmetres més importants, donat que s'ha d'estudiar molt bé per tal d'aconseguir el màxim rendiment a la quantia de fibres, tenint en compte els següents paràmetres:

- Amb fibres més esveltes s'obté **més eficàcia**, donat que disposem de més fibres per a una quantia determinada.
- Les fibres més esveltes tenen una **millor adherència**, augmentant la resistència a l'arrencament, però també s'ha de verificar que **no es produeix el trencament de la fibra abans del lliscament**, sinó es produiria un trencament fràgil.
- Per a que hi hagi una correcta distribució de fibres ha de mantenir una certa relació amb les dimensions de l'àrid , aquestes han de tenir una **longitud mínima de 2 a 2,5 vegades el diàmetre equivalent a l'àrid major**.

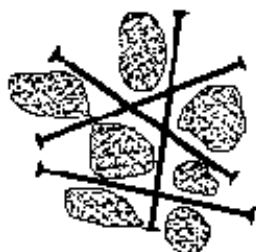


Fig. 4.1.2 Correcte distribució de fibres. [4]

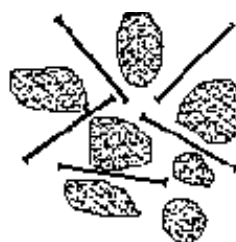


Fig. 4.1.3 Deficient distribució de fibres. [4]

·Fibres massa esveltes dificulten la treballabilitat i afavoreixen la **formació d'ericons** (boles de fibres).

·Les dosificacions de fibres més usals per a usos estructurals estan entre el **40 i 60 kg/m³**, arribant alguns casos fins a **100 kg/m³**.



Fig. 4.1.4 Formació d'ericons. [5]

REFERÈNCIES:

- [3] F. Laranjeria, C. Molins, A. Aguado, Comportamiento a tracción de hormigones reforzados con fibras de acero.
- [4] J. Gonzalez, A. Laporta, C. Tío, Sustitución total o parcial de armadura pasiva por hormigones con fibras en hormigones estructurales.
- [5] A. Aguado, Tendencias en los hormigones con fibras.

4.2 POSTA EN OBRA DEL FRFA, INFLUÈNCIA DEL FORMIGONAT I EL PROCÉS DE VIBRACIÓ EN L'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES.

Durant la posada en obra del formigó s'han d'**evitar les discontinuïtats de formigonat**, ja que pot donar juntes fredes sense continuïtat de fibres. Quant això sigui inevitable s'haurà de disposar elements d'unió entre formigonats.

L'addició de fibres al formigó **redueix la treballabilitat**, per aquest motiu s'ha de compensar amb la utilització de **fluïdificants i correccions a la dosificacions** (amb un nivell més alt d'àrids fins). Per altra banda, s'han d'evitar els sistemes de vibrat interiors, ja que afavoreixen **l'efecte xemeneia** (orientació circular de les fibres al voltant del vibrador).



Fig. 4.2.2 Compactació amb vibrador intern. [6]

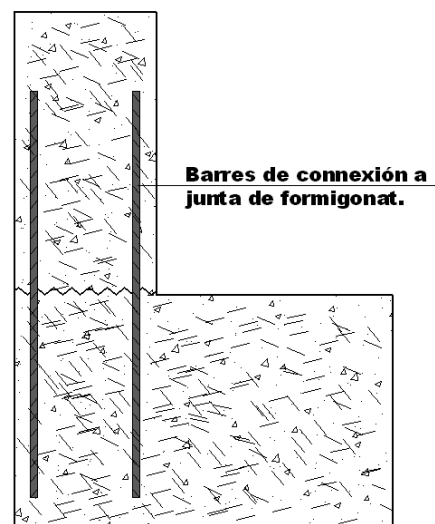


Fig. 4.2.1 Connectors a junta de formigonat.

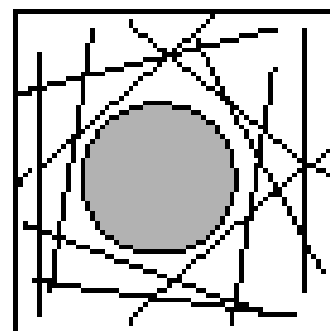


Fig. 4.2.3 Efecte xemeneia. [4]

Per evitar els treballs de compactació amb vibradors interns que poden provocar distribucions de les fibres no desitjades es podem fer servir **vibradors externs** o **formigons autocompactants**.

ASPECTES QUE AFAVOREIXEN L'ORIENTACIÓ DE LES FIBRES:

FORMIGONAT:

·En formigons **autocompactants**, les fibres **s'orienten en la direcció del flux**, en elements lineals pot ser favorable, però no així en elements bidireccionals.

L'orientació de les fibres en direcció del flux es pot apreciar al següent assaig:

S'omplen 12 provetes de tres maneres diferents:

- Centre (C)**: El formigó s'avoca des de el centre de la proveta.
- Tubo (T)**: El formigó es fa passar per un tub de 5 m de longitud.
- Vertical (V)**: La proveta s'omple col·locada verticalment.

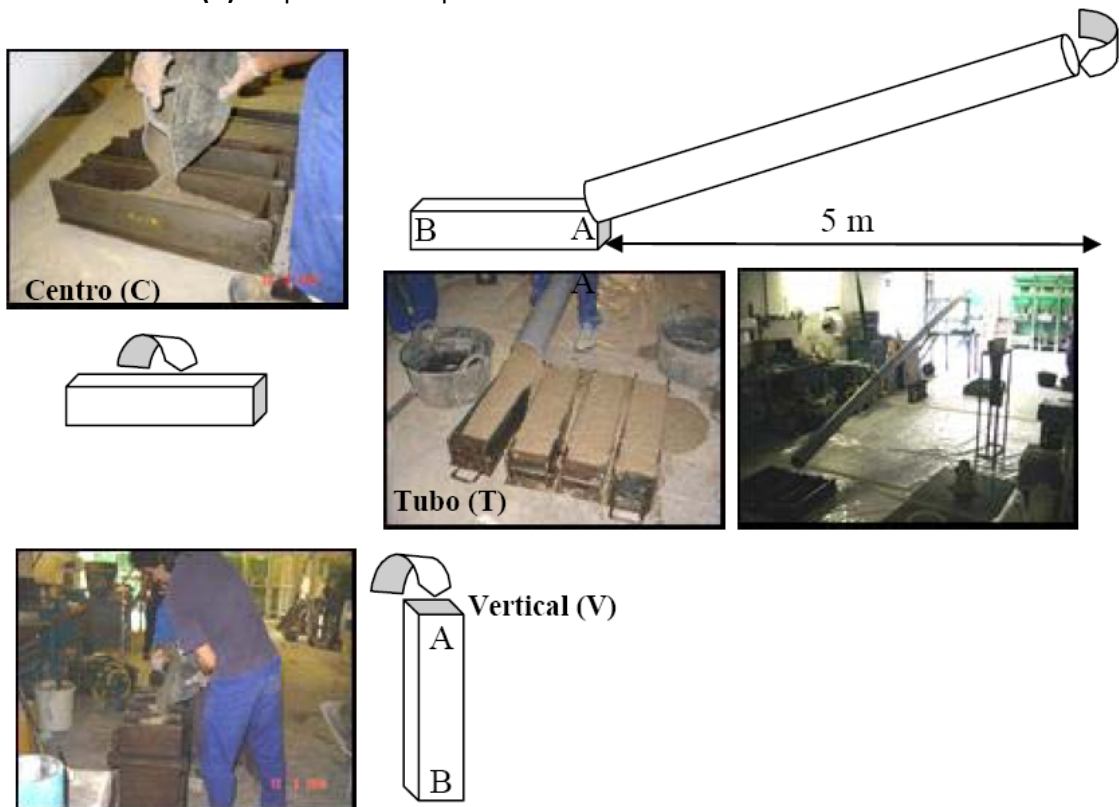


Fig. 4.2.4 Procediments d' omplert de provetes. [7]

·En un assaig de flexió simple, les **provetes tipus (T)** han donat resultats de carrega de trencament més elevats donats per una **orientació preferencial de les fibres**, en direcció longitudinal.

VIBRAT EXTERIOR:

·Les fibres tendeixen a orientar-se **perpendicularment** a la direcció del vibrat.

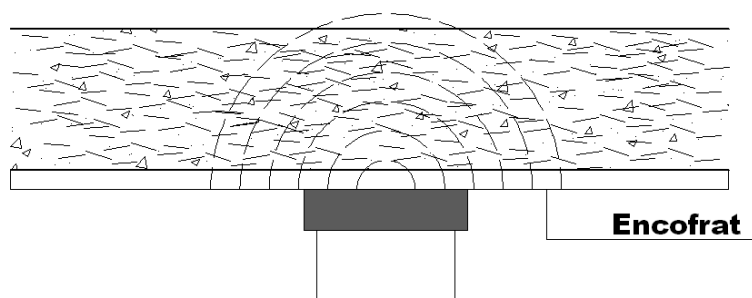


Fig. 4.2.5 Efecte vibrat exterior.

EFFECTE PARET:

•Les fibres pròximes a l'encofrat tendeixen a orientar-se en direcció paral·lela a la superfície de l'encofrat. Aquest efecte és **especialment favorable en elements de poc gruix**.

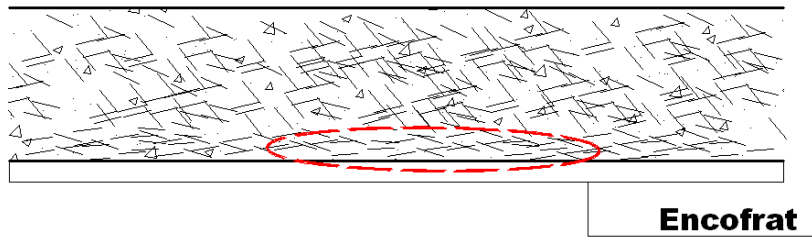


Fig. 4.2.5 Efecte paret zona pròxima a l'encofrat.



Fig. 4.2.6 Efecte paret en tubs prefabricats (amb gruixos de paret petits). [8]

REFERÈNCIES:

- [4] J. Gonzalez, A. Laporta, C. Tío, Sustitución total o parcial de armadura pasiva por hormigones con fibras en hormigones estructurales.
- [6] P. Serna, Jornada sobre aplicaciones estructurales de hormigón con fibras.
- [7] B. Barragán, C. Torrijos, R. Zerbino, Jornada sobre aplicaciones estructurales de hormigón con fibras.
- [8] A. De la Fuente, J. Armengou, Jornada sobre aplicaciones estructurales de hormigón con fibras.

4.3 EQUACIONS CONSTITUTIVES DEL MATERIAL I ELS COEFICIENTS DE SEGURETAT DEL MATERIAL.

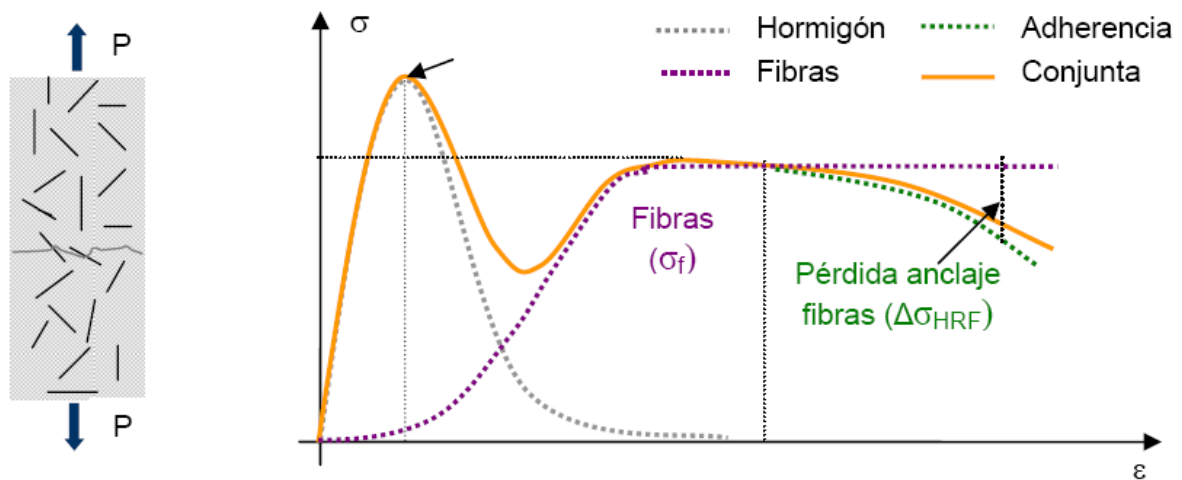


Fig. 4.3.1 Forma de l'equació constitutiva per a element de FRFA sotmès a tracció o flexió. [9]

Com es pot apreciar, la **tensió més elevada es troba al moment de primera fissura**, dependent bàsicament de la resistència a tracció de la matriu de formigó (les fibres tenen molt poca influència en aquesta primera fase). Per tant, una manera de millora el comportament del material és amb la utilització de matrius amb alta resistència a tracció, la qual cosa s'aconsegueix, amb la utilització de formigons d'alta resistència (augmentant la resistència a compressió i tracció).

La **resistència a tracció del formigó** en massa es pot extraure de les fórmules indicades al art. 39.1 de la EHE08:

$$F_{ct,m} = 0,3 F_{ck}^{2/3} \text{ per a } (F_{ck} < 50 \text{ N/mm}^2) \quad [10]$$

$$F_{ct,m} = 0,58 F_{ck}^{1/2} \text{ per a } (F_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2) \quad [10]$$

Per obtenir la **resistència característica a tracció**, els valors obtinguts s'han de multiplicar per 0,7:

$$F_{ct,k} = F_{ct,m} \cdot 0,7 \quad [10]$$

La **resistència mitjana a flexotracció**, és funció del cantell de l'element (h) i ve expressada per la següent fórmula:

$$F_{ct,m,fl} = \max \{ (1,6 - h/1.000) F_{ct,m}; F_{ct,m} \} \quad [10]$$

De la mateixa manera per obtenir la **resistència característica a flexotracció**, els valors obtinguts s'han de multiplicar per 0,7:

$$F_{ct,k,fl} = F_{ct,m,fl} \cdot 0,7$$

	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80
$F_{c,k}$ (N/mm ²) (Compressió)	25	30	35	40	50	60	70	80
$F_{ct,m}$ (N/mm ²) (Tracció)	2,56	2,90	3,21	3,51	4,07	4,49	4,85	5,19
$F_{ct,k}$ (N/mm ²) (Tracció)	1,80	2,03	2,25	2,46	2,85	3,14	3,40	3,63
$F_{ct,d}$ (N/mm ²) (Tracció)	1,20	1,35	1,50	1,64	1,90	2,10	2,26	2,42
$F_{ct,m,fl,30}$ (N/mm ²) (Flexotracció)	3,33	3,77	4,17	4,56	5,29	5,84	6,31	6,74
$F_{ct,k,fl,30}$ (N/mm ²) (Flexotracció)	2,33	2,64	2,92	3,19	3,71	4,09	4,42	4,72
$F_{ct,d,fl,30}$ (N/mm ²) (Flexotracció)	1,56	1,76	1,95	2,13	2,47	2,73	2,94	3,15

Fig. 4.3.2 Quadre de tensions admissibles de formigó en massa.

Quant la secció ja està **fissurada**, la resistència ve donada per les fibres d'acer, directament proporcional a la qualitat de l'acer i quantitat de fibres, amb la limitació de la màxima dosificació admissible, que està condicionada a la treballabilitat del formigó.

Hi ha una **tercera fase** que comença quan és produeix el **lliscament de la fibra per pèrdua d'ancoratge**. Aquesta fase és important que es produeixi per tal de garantir un trencament dúctil de la secció (en contraposició del trencament de la fibra que provocaria un trencament fràgil).

Donat que la resistència residual del formigó reforçat amb fibres d'acer, depèn bàsicament del tipus de fibra, qualitat de l'acer i tipus de formigó, encara que a les normatives existents hi ha diferència de criteris a l'hora d'implantar l'equació constitutiva, totes elles coincideixen en la **necessitat de realitzar assajos per tal de determinar la resistència a tracció** del formigó reforçat amb fibres d'acer, per a cada tipus, en funció de la fibra utilitzada, la quantia i el tipus de formigó.

Per altra banda, hi ha estudis estimatius per obtenir els valors de referència del formigó reforçat amb fibres d'acer, a partir de fórmules on les variables són: **Resistència del formigó, quantia, esveltesa, longitud i geometria de les fibres**.

Els valors obtinguts de l'aplicació d'aquestes fórmules s'hauran de contrastar amb els corresponents assajos.

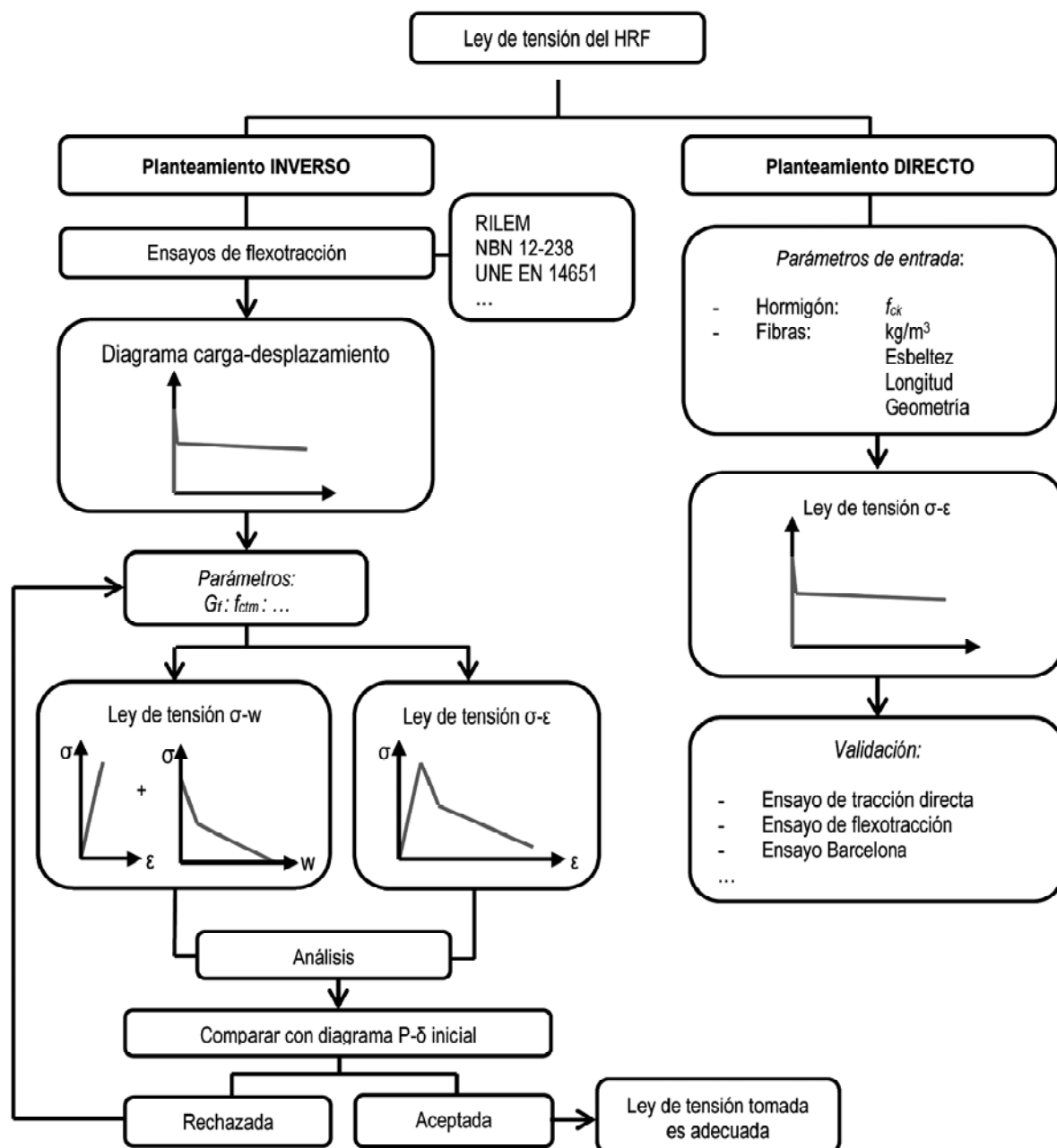


Fig. 4.3.3 Esquema de procediments per a l'obtenció de l'equació constitutiva. [11]

REFERÈNCIES:

- [9] L. Coto, Ecuaciones constitutivas para el análisis de secciones de HRFA.
- [10] EHE08.
- [11] F. Laranjeria, Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete.

Plantejament invers:

Segons les diferents normatives analitzades es poden diferenciar **dos tipus d'assajos**:

·El de tres punts (birecolzada amb carrega central)

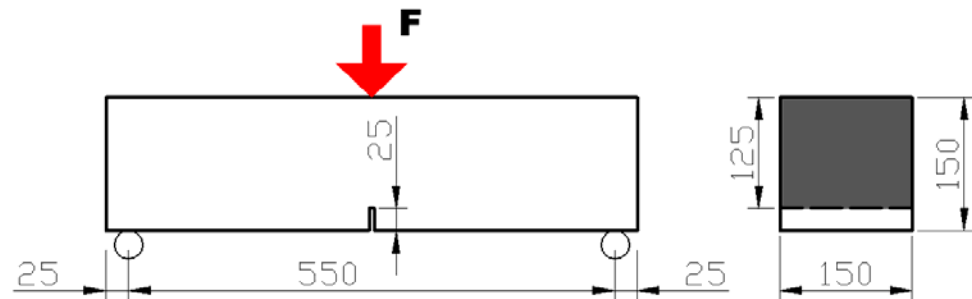


Fig. 4.3.4 Assaig segons UNE EN 14651.

·El de 4 punts (birecolzada amb carrega col·locada 1/3 i 2/3 de la llum)

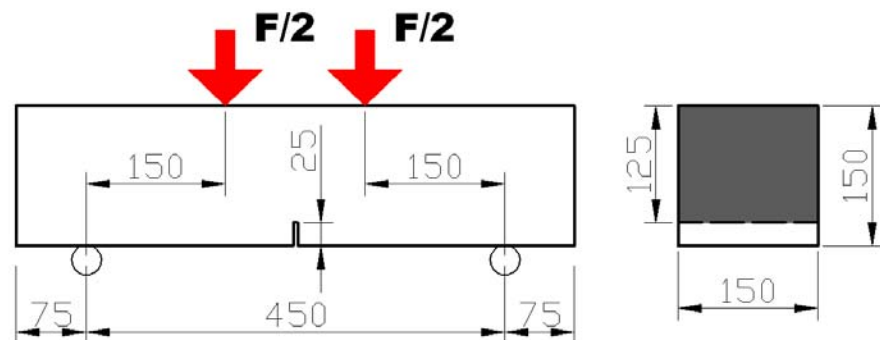


Fig. 4.3.5 Assaig segons NBN B 15-238.

Del que es tracta es d'obtenir uns valors de càrrega per a unes determinades deformacions, valorades o bé per l'ample de fissura (CMOD, crack mouth opening displacement) o per la fletxa (δ).

El CMOD i δ son equivalents, a l'assaig segons EN-14651,2005, es podem relacionar aplicant la següent expressió:

$$\text{CMOD}_{\text{EN}} = 1,18 \cdot \delta_{\text{EN}} - 0,0416 \text{ (mm)} \quad [12]$$

Aplicant la fórmula anterior obtenim els valors equivalents:

CMOD (mm)	δ (mm)
0,5	0,46
1,5	1,32
2,5	2,17
3,5	3,00

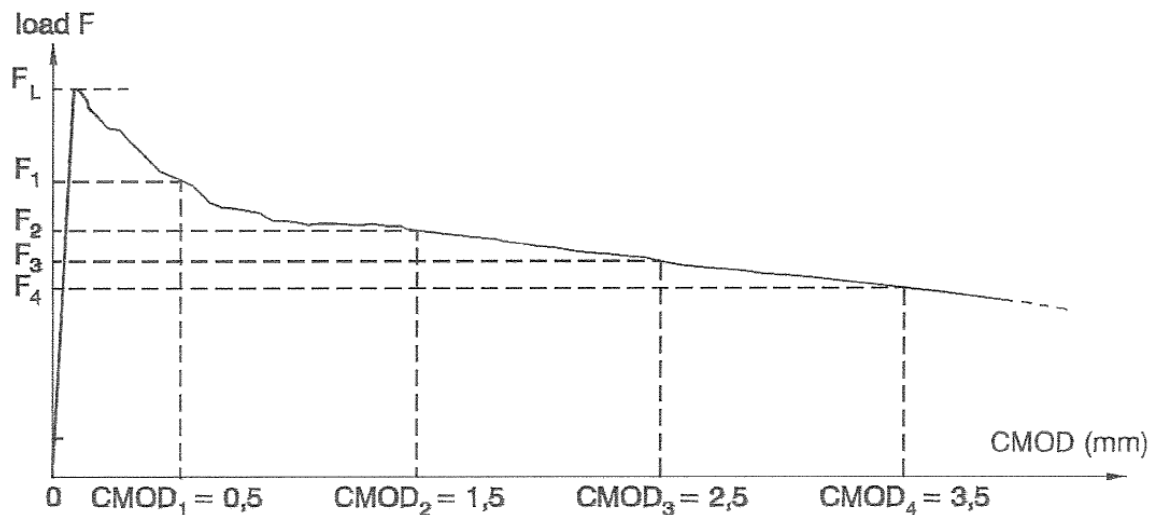


Fig. 4.3.6 Diagrama càrrega-deformació. [12]

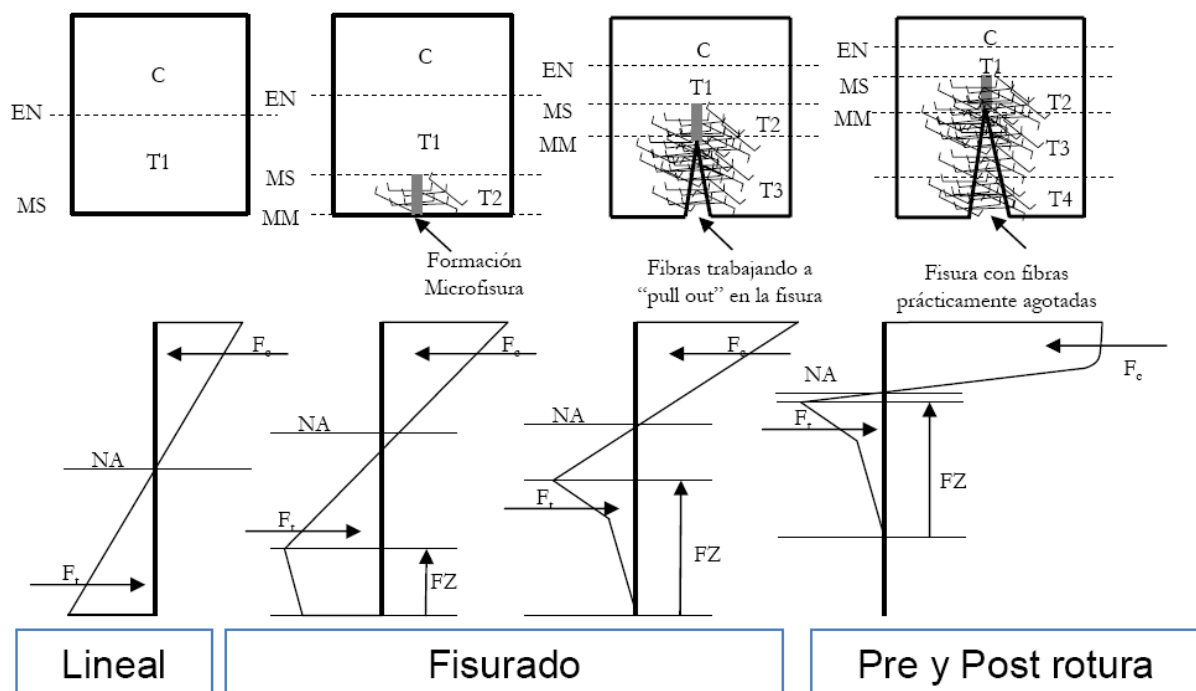


Fig. 4.3.7 Modelització contínua de seccions fins a rotura. [2]

Fins a l'aparició de la primera fissura, la secció segueix un regim elàstic. En estat de fissuració, el comportament és plàstic, diferenciant dos fases: plastificació de la fibra i pèrdua d'ancoratge de la fibra.

De l'assaig s'obté el límit de proporcionalitat (LOP), que es la tracció màxima que s'assoleix en el diagrama carrega-deformació, i es correspon amb el punt de primera fissura. Per altra banda s'obté quatre resistències residuals a flexió, corresponents a obertures de fissura CMOD.

Com es pot observar, a més deformació menys capacitat de càrrega de la secció, degut a la pèrdua d'ancoratge de les fibres més traccionades. Per aquest motiu, les normatives proposen diferents tipus de gràfiques, en funció de la deformació màxima admissible.

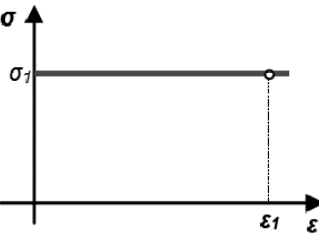
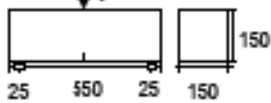
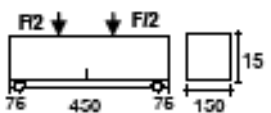
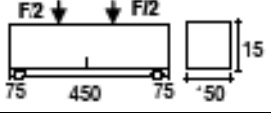
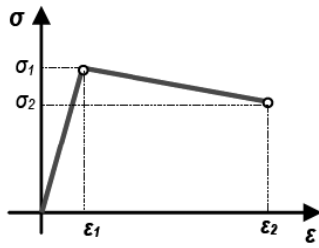
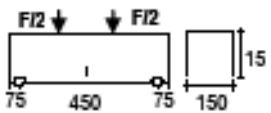
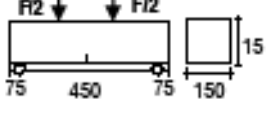
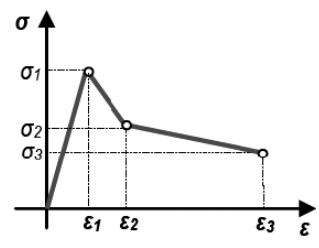
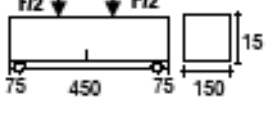
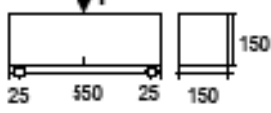
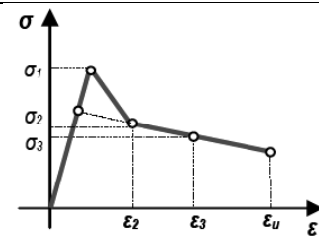
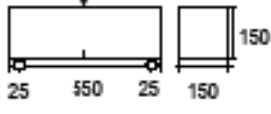
Diagrama	Paràmetres	Assaig	
	$\sigma_1 = f_{ctRd} = 0,33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ flexión; } 10\text{‰ tracción}]$	3-point bending test. UNE EN 14651 	EHE (ESPANYA)
	$\sigma_1 = f_{Ftu} = f_{eq2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ reblandecimiento ; } 10\text{‰ endurecimiento}]$	4-point bending test. UNI 11039 	CNR-DT 204 (ITALIA)
	$\sigma_1 = f_{eq'ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \alpha_{ct}^f \leq f_{eq'ctd,I}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	4-point bending test. UNI 11039 	DBV (ALEMANIA)
	$\sigma_1 = f_{eq'ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq'ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq'ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	4-point bending test. UNI 11039 	DBV (ALEMANIA)
	$\sigma_1 = f_{Fts} = 0,45 f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Ftu} = k [f_{Fts} - (w_u/w_{i2})(f_{Fts} - 0,5 f_{eq2} + 0,2 f_{eq1})]$ $k = [0,7 \text{ tracción pura, } 1 \text{ resto de casos}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\text{‰ reblandecimiento ; } 10\text{‰ endurecimiento}]$	4-point bending test. UNI 11039 	CNR-DT 204 (ITALIA)
	$\sigma_1 = f_{ctd} = \alpha_c^f \cdot f_{ctk,fl} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq'ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_3 = f_{eq'ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq'ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\text{‰}$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	4-point bending test. UNI 11039 	DBV (ALEMANIA)
	$\sigma_1 = 0,7 f_{ctm,fl} (1,6-d)$ $\sigma_2 = 0,45 \cdot K_h \cdot f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0,37 \cdot K_h \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\text{‰}$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 25\text{‰}$	3-point bending test. RILEM test. 	RILEM
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0,1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2,5 / l_{cs} (1 : \text{long. crítica})$ $\epsilon_u = [20\text{‰ flexión; } 10\text{‰ tracción}]$	3-point bending test. UNE EN 14651 	EHE (ESPANYA)

Fig. 4.3.8 Models constitutius de diferents normatives. [13]

Per tal de definir les tensions a tracció residual segons el CMOD, es basa en la norma EHE:

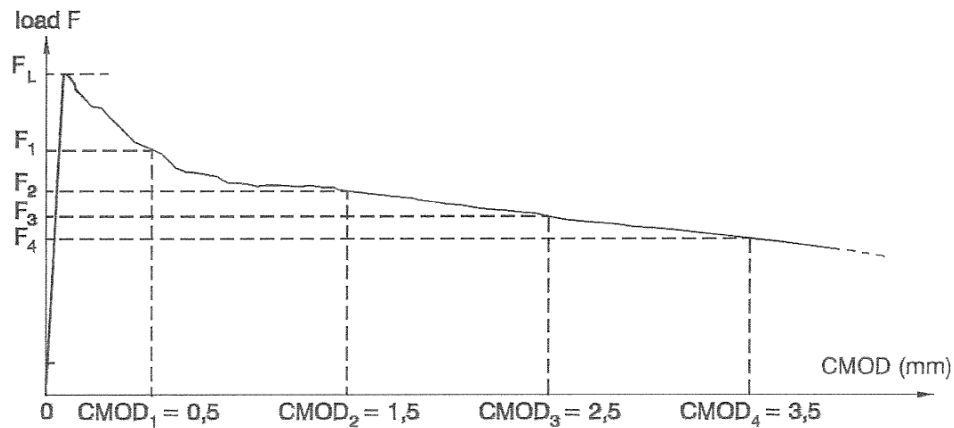


Fig. 4.3.9 Diagrama càrrega-deformació. [12]

El **moment** es relaciona amb la càrrega aplicada al centre de la biga:

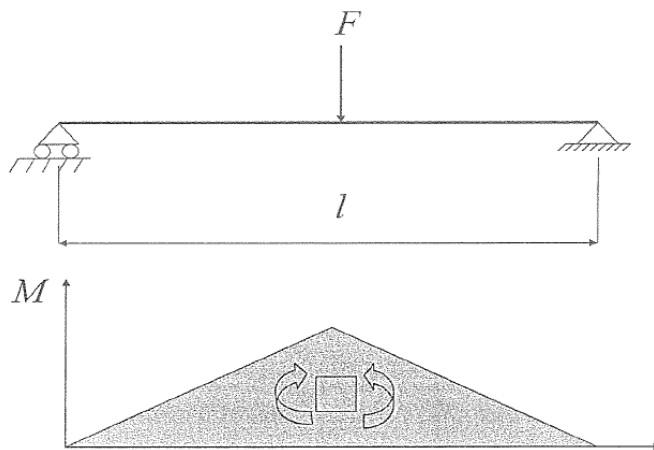
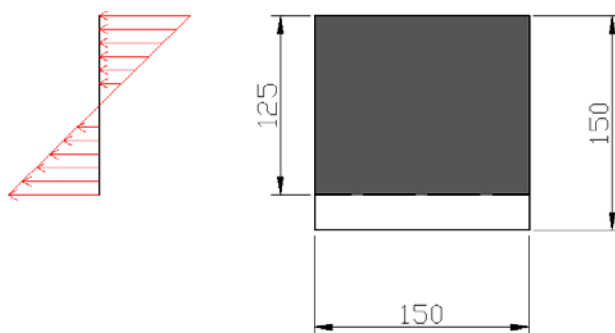


Fig. 4.3.10 Diagrama de moments per a càrrega puntual al centre de la biga. [12]

$$M = F \cdot L / 4$$

La **tensió de tracció** s'extreu directament a partir del **mòdul resistent de la secció neta**:



$$\sigma = M / (b h^3 / (12 \cdot h / 2))$$

De manera que per a cada F_j (corresponent a cada CMOD), obtenim σ_j :

$$\sigma_j = 3 \cdot F_j \cdot L / (2 \cdot b h^2)$$

Les tensions s'obtenen mitjançant un distribució elàstica lineal de tensions a la secció. Un cop superat el límit de proporcionalitat, la secció comença a fissurar-se, trobant-se parcialment plastificada a la zona de tracció, on actua la resistència residual a tracció.

Per altra banda, durant la plastificació de la secció, es produeix una migració de la línia neutra cap al cap comprimit, degut a una major resistència a compressió del formigó, respecte a la tracció residual del FFRA.

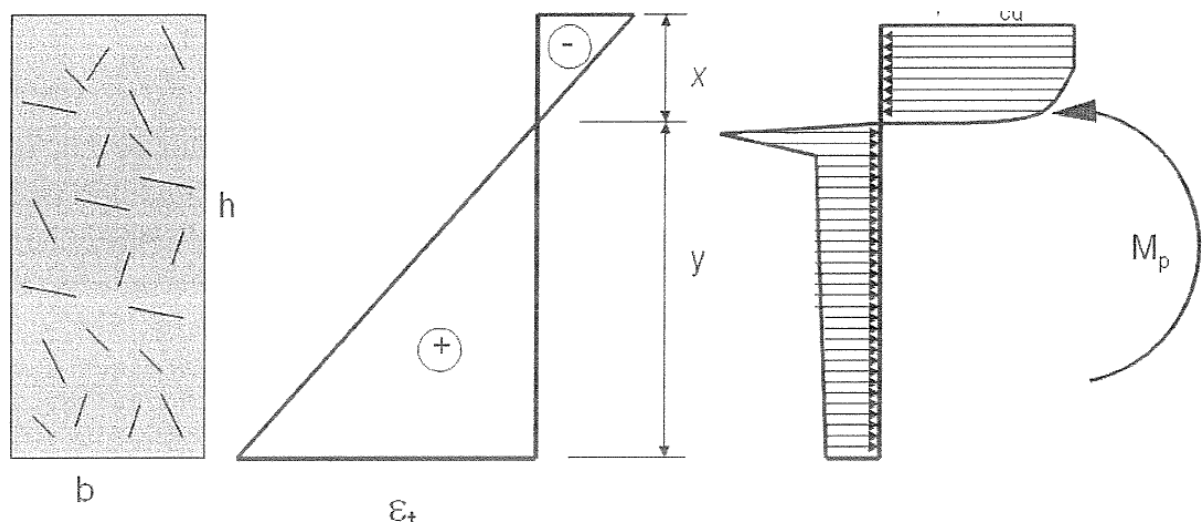


Fig. 4.3.11 Diagrames de deformació i tensions real. [12]

La EHE utilitza el valor de la resistència corresponent al límit de proporcionalitat obtingut a l'assaig i les resistències residuals a flexotracció associades a un CMOD de 0,5 i 2,5 mm. Per obtenir els **valors característics** d'aquestes resistències, **aplica un coeficient estadístic de 0,7 als valors obtinguts als assajos**.

Amb aquest valors proposa dos tipus de diagrames per a calcular el moment últim de la secció (els diagrames són de càlcul, per la qual cosa a la resistència característica se li ha d'aplicar el coeficient de minoració del material (γ)).

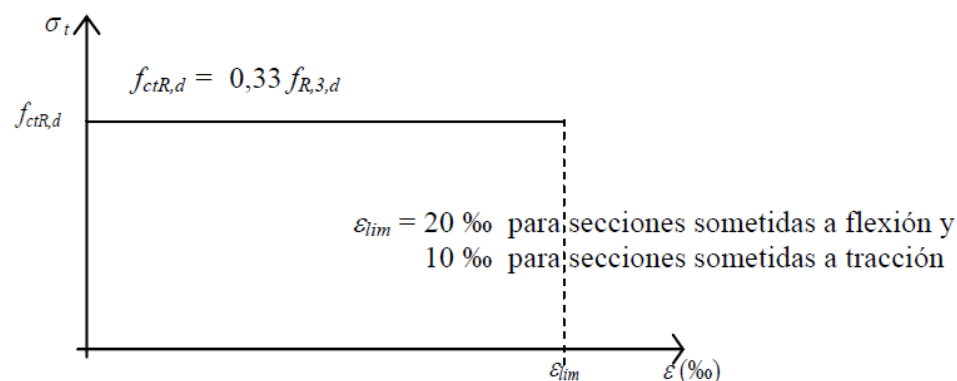
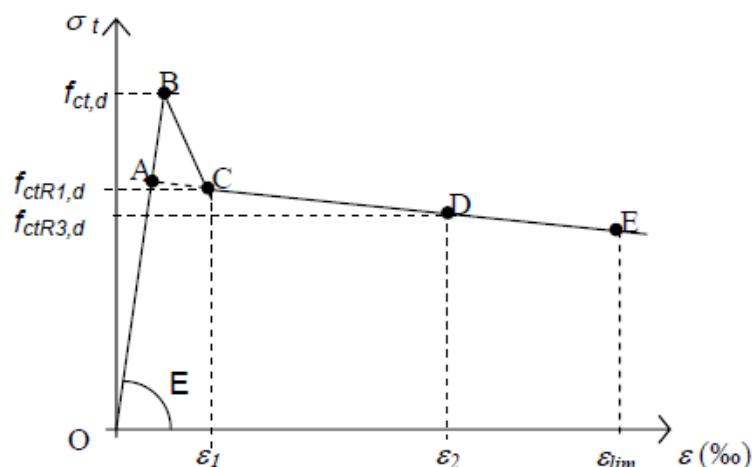


Fig. 4.3.12 Diagrama de càlcul rectangular. [10]



donde:

f_L Carga correspondiente al límite de proporcionalidad

$f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$

$f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$

$f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$

$k_1 = 1$ para secciones sometidas a flexión y 0,7 para secciones sometidas a tracción

Fig. 4.3.13 Diagrama de càlcul multilinear. [10]

Amb el valor de $f_{ctR,d}$ del diagrama rectangular, o $f_{ctR3,d}$ del diagrama multilinear, s'obté la resistència a flexió residual mitjançant el càlcul de la secció totalment plastificada.

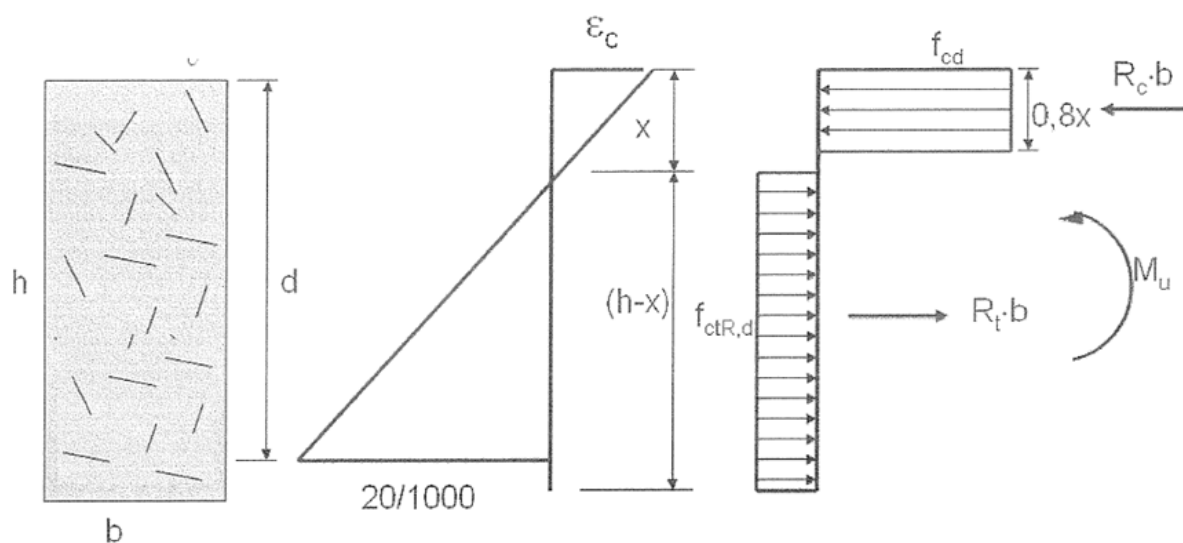


Fig. 4.3.11 Diagrames de deformació i tensions simplificat. [12]

Mitjançant la condició d'equilibri, on la resultant del cap traccionat ha de ser igual a la resultant del cap comprimit i coneixent els valors de f_{cd} (compressió) i $f_{ctR,d}$ (tracció), s'obté la posició de la Línia Neutra (X).

ALTRES TIPUS D'ASSAJOS

PLAQUES

També s'han desenvolupat altres tipus d'assajos, consistents en la avaluació de la capacitat d'absorció d'energia per a elements tipus placa, on es relaciona la carga suportada amb la deformació de la placa.

Els assajos més representatius d'aquest tipus d'avaluació són el "PLATE BENDING TEST" (proposat per la EFNARC) i el "ROUND DETERMINATE TEST".

PLATE BENDING TEST

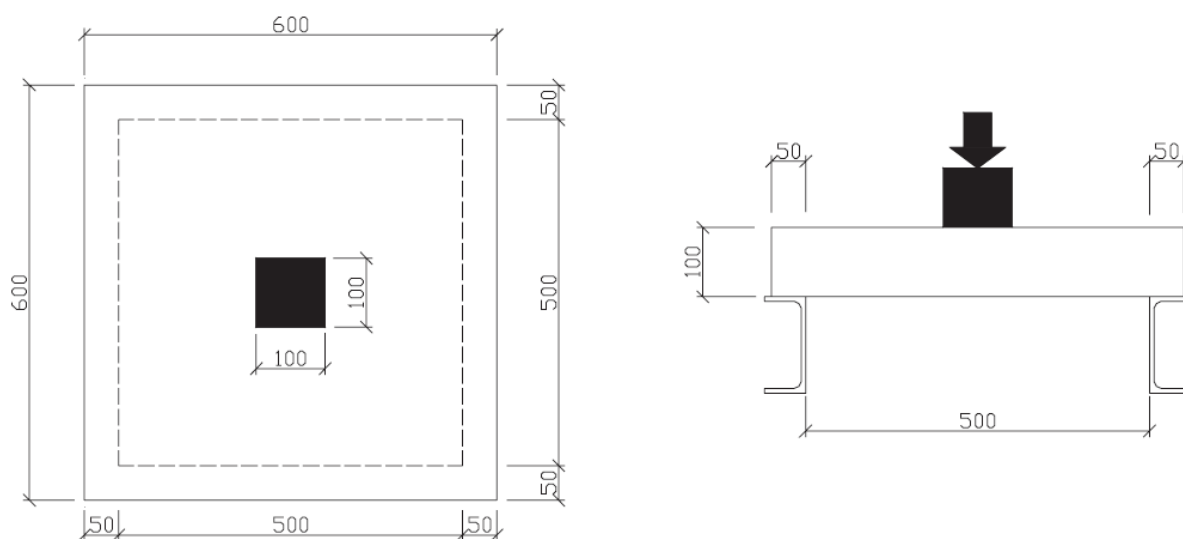


Fig. 4.3.12 Esquema disposicions de l'assaig. [14]

Llosa de **600x600x100 mm** recolzada perimetralment sobre marc de 500x500 mm i 50 mm de gruix. Amb aplicació centrada de la càrrega sobre una superfície de 100x100 mm.

Es determina la absorció d'energia per a una **fletxa de 25mm** al centre de la placa.



Fig. 4.3.13 Trencament de proveta. [15]

ROUND DETERMINATE TEST

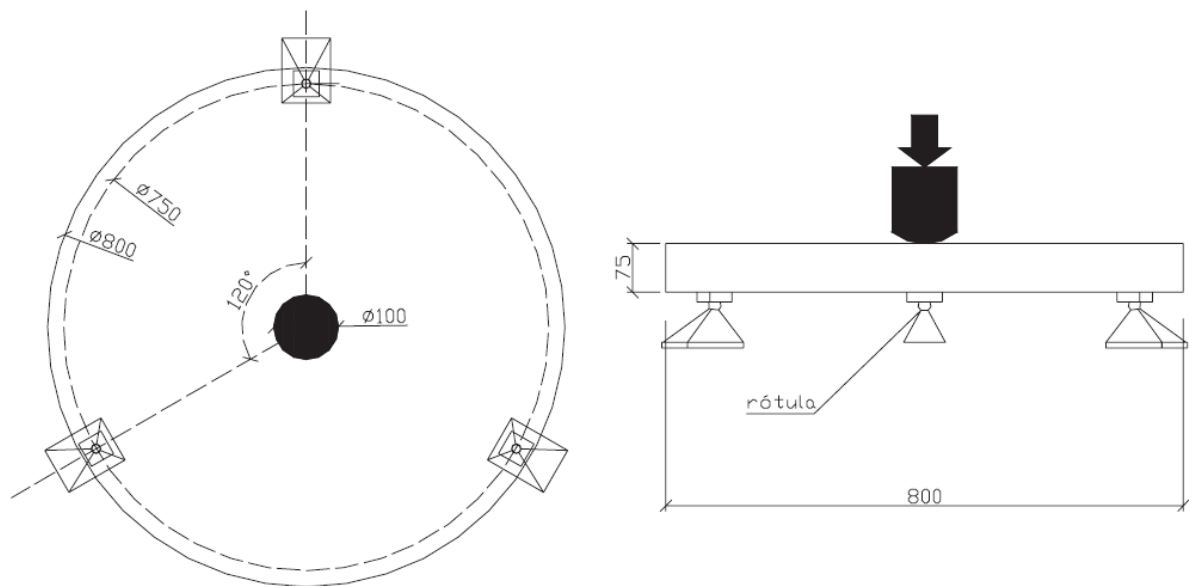


Fig. 4.3.14 Esquema disposicions de l'assaig. [14]

Llosa de **Ø800mm x 75mm de gruix** recolzada sobre tres rótules equidistants circumsrites en un cercle de **Ø750mm**. Amb aplicació centrada de la càrrega sobre una superfície de **Ø100mm**.

Es determina la absorció d'energia per a una **fletxa de 40mm** al centre de la placa.



Fig. 4.3.15 Trencament de proveta. [15]

Els resultats d'aquests assajos depent bàsicament del tipus de fibra, la seva quantia i el tipus de formigó. Això ha portat als diferents fabricants de fibres, a realitzar els assajos pertinents per tal de poder especificar el tipus de formigó i la quantia de fibres necessària per tal d'aconseguir diferents nivells d'absorció d'energia i com aquest es pot relacionar amb la capacitat resistent de la secció: **mètode del factor d'energia**.

A mode **d'exemple**, s'adjunta les relacions entre el factor energia i la qualitat del HRFA, obtinguts per un d'aquest fabricants:

Defineix **el factor d'energia** com l'energia de ruptura d'un panell de 600x600x100 mm per a una deformació de 30 mm.

La taula següent mostra la correlació entre el factor d'energia i paràmetre ξ (relaciona el moment el cantell de la secció) definit per la expressió:

$$\xi = M / (0,45 \cdot h^2) \quad [16]$$

On: M= moment de càlcul.
h= cantell de la llosa.

Factor d'energia (J)	ξ (N/mm ²)
300	0,90
500	1,20
700	1,50
900	1,70
1200	2,10
1500	2,70
1800	3,10

Fig. 4.3.16 Taula de relació entre el factor d'energia i ξ . [16]

A la taula següent es pot veure la relació entre el tipus de formigó en masa i quantia de fibres amb el factor d'energia:

Factor Energia (J)	Dosificació de fibra (kg/m ³)	Formigó en masa
300	20	C30 0-20 mm
500	30	C30 0-20 mm
700	40	C30 0-20 mm
900	50	C35 0-20 mm SP*
1200	65	C35 0-20 mm SP*
1500	80	C40 0-12 mm SP*
1800	100	C40 0-12 mm SP*

SP indica la necessitat de fer servir superfluidificants d'última generació.

Fig. 4.3.17 Taula de relació entre el factor d'energia, quantia de fibra i tipus de formigó.[16]

ASSAJOS DE TRACCIÓ INDIRECTA

Els assajos anteriors necessiten provetes de grans dimensions, de cost elevat i difícils de manipular:

Proveta de 600x150x150 mm;

$$(0,6\text{m} \times 0,15\text{m} \times 0,15\text{m}) \times 2.500\text{ kg/m}^3 = \mathbf{33,75\text{ kg}}$$

Proveta de 600x150x150 mm;

$$(0,6\text{m} \times 0,6\text{m} \times 0,10\text{m}) \times 2.500\text{ kg/m}^3 = \mathbf{90\text{ kg}}$$

Proveta de Ø800x75 mm;

$$((0,4\text{m})^2 \times 3,1416 \times 0,075\text{m}) \times 2.500\text{ kg/m}^3 = \mathbf{94,25\text{ kg}}$$

Aquest fet fan que el control de qualitat mitjançant aquest tipus d'assajos siguin costosos. Per aquest motiu, s'ha d'avaluar altres formes més simples per tal d'estimar la capacitat a tracció del material:

- Assaig Brasiler.
- Assaig Barcelona (de doble punxonament).

Aquest assajos **determinen la capacitat a tracció** del material a partir de **l'aplicació de forces de compressió a una proveta cilíndrica** de petites dimensions; a l'assaig Brasiler, l'esforç s'aplica perpendicular a la directriu del cilindre, mentre que a l'assaig Barcelona la carga s'aplica en la direcció de la directriu.

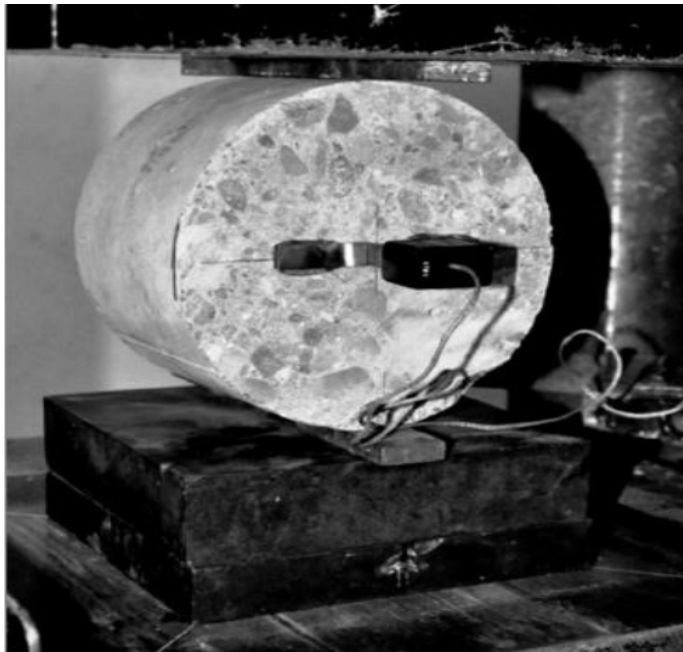


Fig. 4.3.18 Assaig Brasiler.[1]

Assaig Barcelona (de doble punxonament).

Proveta de Ø150mm x 150mm (6,63kg)

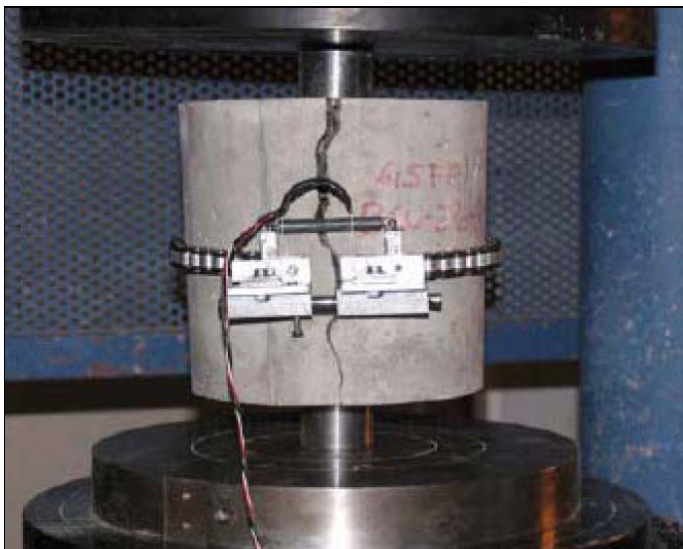


Fig. 4.3.19 Assaig Barcelona.[15]

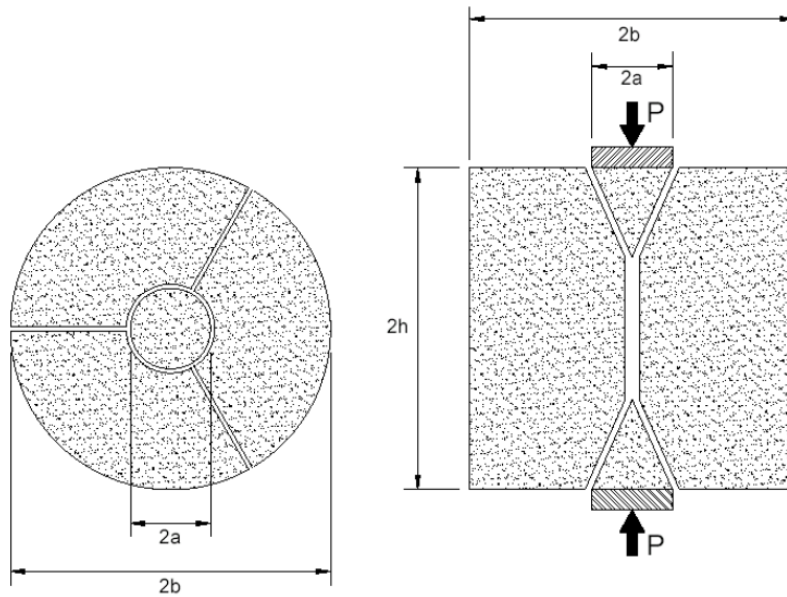


Fig. 4.3.20 Esquema de trencament de la proveta. [17]

La forma de determinar la resistència a tracció del material es mitjançant el mètode de bieles i tirants segons l'esquema següent:

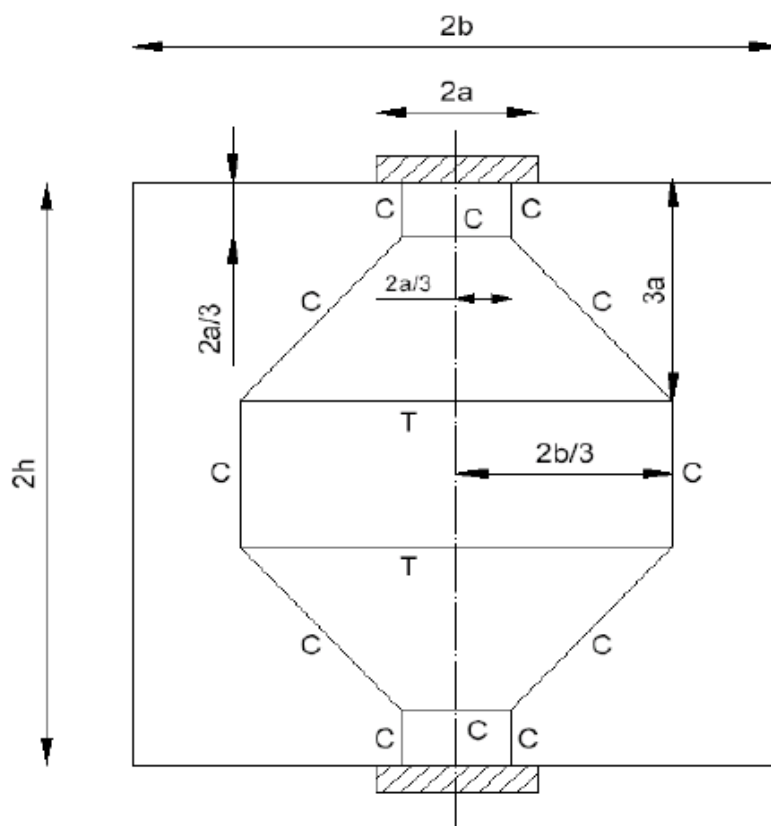


Fig. 4.3.21 Esquema de bieles i tirants. [17]

De les dues figures anteriors s'extreu el següent esquema:

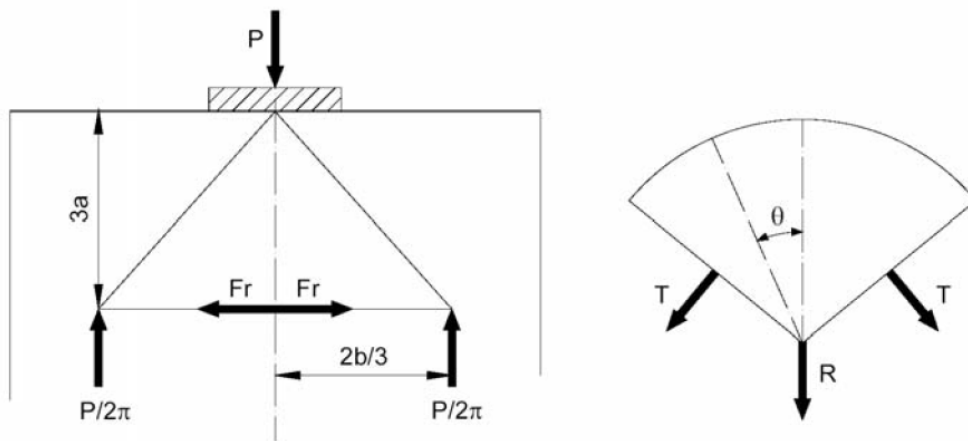


Fig. 4.3.22 Esquema de descomposició de la càrrega.[17]

Fent l'equilibri de moments al punt d'aplicació de la càrrega externa "P" sobre la proveta, per un $d\theta$, s'obté la següent equació, on F_r representa la força a tracció radial que s'obté:

$$F_r = \left(\frac{P}{2\pi} \cdot \frac{2b}{3} \right) / 3a = \frac{P}{\pi} \cdot \frac{b}{9a} \quad [17]$$

Considerant una secció de trencament de $h \cdot b$:

$$F_{ct} = \frac{P}{9\pi \cdot h \cdot a} \quad [17]$$

On:

- P, és la càrrega pic aplicada a la proveta.
- h, és la semi-alçada de la proveta.
- a, el radi del plat de càrrega.

Aquest mètode servirà tant per determinar la càrrega màxima abans de la fissuració com la càrrega residual post-fissuració.

REFERÈNCIES:

- [1] Imatges extretes d'internet.
- [2] A. Aguado, Formigó armat amb fibres metàl·liques: disseny, càlcul i aplicació.
- [9] L. Coto, Ecuaciones constitutivas para el análisis de secciones de HRFA.
- [10] EHE08.
- [12] A. Maturana, Tesis doctoral.
- [13] A. Blanco, P. Pujades, A. De la Fuente, A. Aguado, Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras.
- [14] T. García, L. Agullo, A. Aguado, G. Canals, Evaluación de la tenacidad en el hormigón proyectado reforzado con fibras poliméricas de alto módulo.
- [15] J. Guardia, Caracterització del comportament a tracció de formigó d'alta treballabilitat reforçat amb fibres d'hacer mitjançant l'assaig Barcelona.
- [16] C. Diez, Estudio de viabilidad de utilización de fibras como alternativa a los refuerzos convencionales en hormigones para la construcción.
- [17] S. Saludes, Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (ensayo Barcelona).

Plantejament directe:

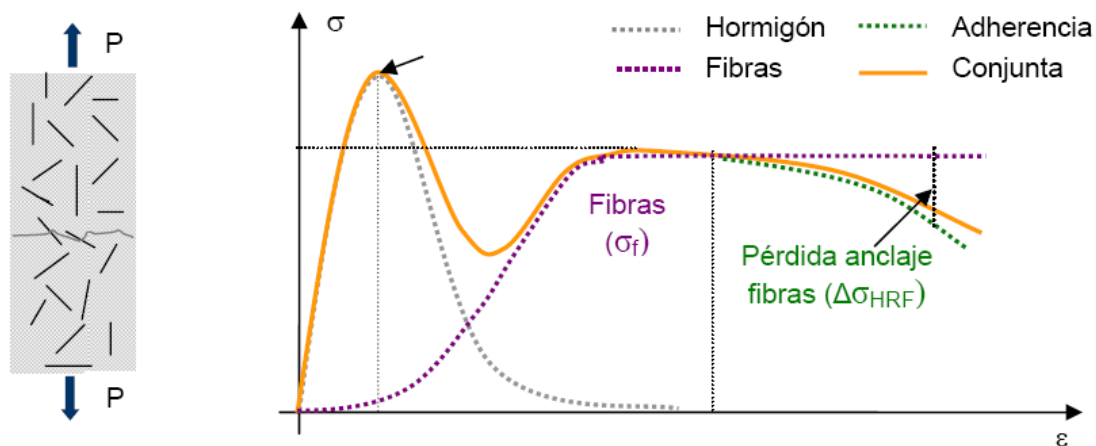


Fig. 4.3.23 Forma de l'equació constitutiva per a element de FRFA sotmès a tracció o flexió. [9]

Com s'ha dit anteriorment, la capacitat resistent del material depèn de tres factors, de forma que l'equació constitutiva pot correspondre a una expressió del següent tipus:

$$\sigma_{HRF} = \sigma_{cont.formigó} + \sigma_{cont.fibres} - \Delta \sigma_{HRF}$$

Essent:

- $\sigma_{cont.formigó}$: és la contribució del formigó en massa.
- $\sigma_{cont.fibres}$: és la contribució de les fibres.
- $\Delta \sigma_{HRF}$: és la pèrdua de tensió per trencament de l'ancoratge de les fibres amb el formigó.

Es poden diferenciar dues fases:

La primera, en regim elàstic (sense fissuració) on la resistència a tracció del material depèn bàsicament de la resistència de la matriu, essent pot significatiu la contribució de les fibres.

La segona fase s'inicia en estat de fissuració; a la part fissurada la matriu no té capacitat de transmetre traccions i són les fibres les que transmeten aquest esforç. En aquesta situació els factors més importants a l'hora de valorar la capacitat resistent són la quantia de fibres, la seva capacitat mecànica i l'ancoratge de les fibres a la matriu. Aquest últim factor és determinant per a poder extreure un alt rendiment a la capacitat mecànica de la fibra. Donada la distribució aleatòria de les fibres, la longitud d'ancoratge de les fibres que cossen la fissura no serà la mateixa, pel fet que algunes fibres tindran més longitud d'ancoratge que d'altres en referència al pla de trencament, fent que no en totes es puguin aprofitar al màxim la seva capacitat mecànica.

El fet que les fibres fallin abans per lliscament de l'ancoratge que per trencament de la fibra, fa que el trencament del material no es produeixi d'una forma fràgil si no dúctil, contribuint a la resistència residual de la secció.

Degut a aquestes dues fases, és lògic que la capacitat resistent del material es determini per a dues situacions diferents:

•**Pre-fissuració:** la capacitat resistent ve determinada per les característiques mecàniques de la matriu.

•**Post-fissuració:** la capacitat resistent ve determinada per les característiques geomètriques i mecàniques de les fibres, la orientació de les fibres en direcció de l'esforç i la capacitat d'ancoratge de les fibres a la matriu.

En la situació **pre-fissuració**, donat la baixíssima influència de les fibres en la capacitat resistent, serà suficient determinar la **resistència a tracció i flexotracció del formigó** en massa, que es pot extraure de les fórmules indicades a la **EHE08**:

$$F_{ct,k} = 0,7 \cdot 0,3 f_{ck}^{2/3} \text{ per a } (f_{ck} < 50 \text{ N/mm}^2) \quad [10]$$

$$F_{ct,k} = 0,7 \cdot 0,58 f_{ck}^{1/2} \text{ per a } (f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2) \quad [10]$$

$$F_{ct,k,fl} = \max \{ (1,6 - h/1.000) F_{ct,k}, F_{ct,k} \} \quad [10]$$

Hi ha ciments en el mercat que milloren el comportament a tracció de la matriu sense necessitat de incrementar la capacitat resistent a compressió, en aquest casos, les fórmules anteriors no són vàlides i s'haurà d'obtenir la resistència a tracció a partir dels assajos pertinents.

A la situació **post-fissuració** la capacitat resistent de la matriu deixa de contribuir, essent **les fibres** les responsables de la transmissió d'esforços entre banda i banda de la fissura.

La **capacitat resistent de les fibres** vindrà determinada per diferents factors:

- Quantia de fibres i capacitat mecànica del material ($A_s \cdot F_y$)
- Orientació de les fibres.
- Comportament de la fibra en situació de fallada d'ancoratge a la matriu.

Al següent gràfic es pot veure el comportament tensió-deformació de les fibres.

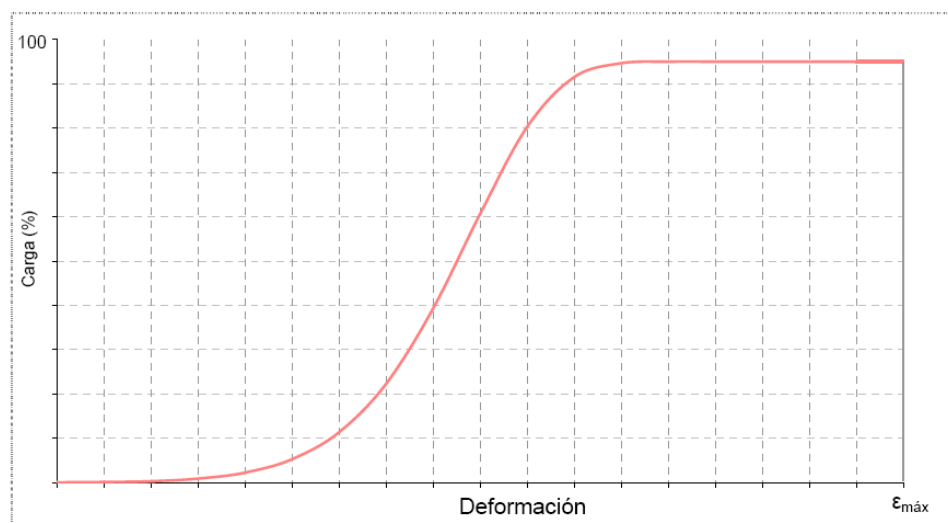


Fig. 4.3.24 Comportament de les fibres al formigó. [9]

Es pot veure tres fases:

- 1ª fase: la matriu suporta tota la càrrega.
- 2ª fase: les fibres suporten la càrrega en regim elàstic de deformació.
- 3ª fase: les fibres suporten la càrrega en regim plàstic de deformació.

L'equació que més s'ajusta a la forma de la gràfica és del tipus:

$$\sigma_{\text{fibres}} = B \left(1 - e^{-KB \left(\frac{\epsilon}{c} \right)^n} \right) \quad [9]$$

Essent:

B: és el valor màxim de càrrega que admeten les fibres. És funció de la quantia de les fibres i de les característiques d'aquestes:

$$B = 0,6 \cdot f_y \cdot \alpha \cdot V_f \cdot E \quad [9]$$

On:

- f_y : tensió de cedència de la fibra a tracció (MPa).

- α : eficiència espacial.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{100}{l} \right) \cdot e^{(5-10 \cdot \rho)}} - \frac{1}{1 + \left(\frac{100}{l} \right) \cdot e^5} \quad [9]$$

On:

l : longitud de la fibra.

ϕ : diàmetre de la fibra.

ρ : Quantia de fibra en percentatge.

- V_f : quantia de fibra (en tant per 1).

- E : funció de eficiència de la fibra, relacionada amb l'aleatorietat de la posició de la fibra en un pla de la secció transversal de l'element.

$$E = \cos^2 \theta$$

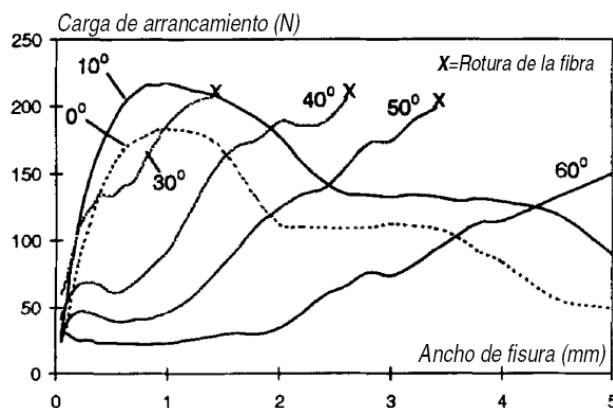


Fig. 4.3.25 Assaig d'arrencament de fibres amb ganxo amb diferents orientacions [3]

·ε: és la deformació que es produeix a l'aplicar cert nivell de càrrega.

·n: és el paràmetre que controla el pendent al punt d'inflexió de la corba.

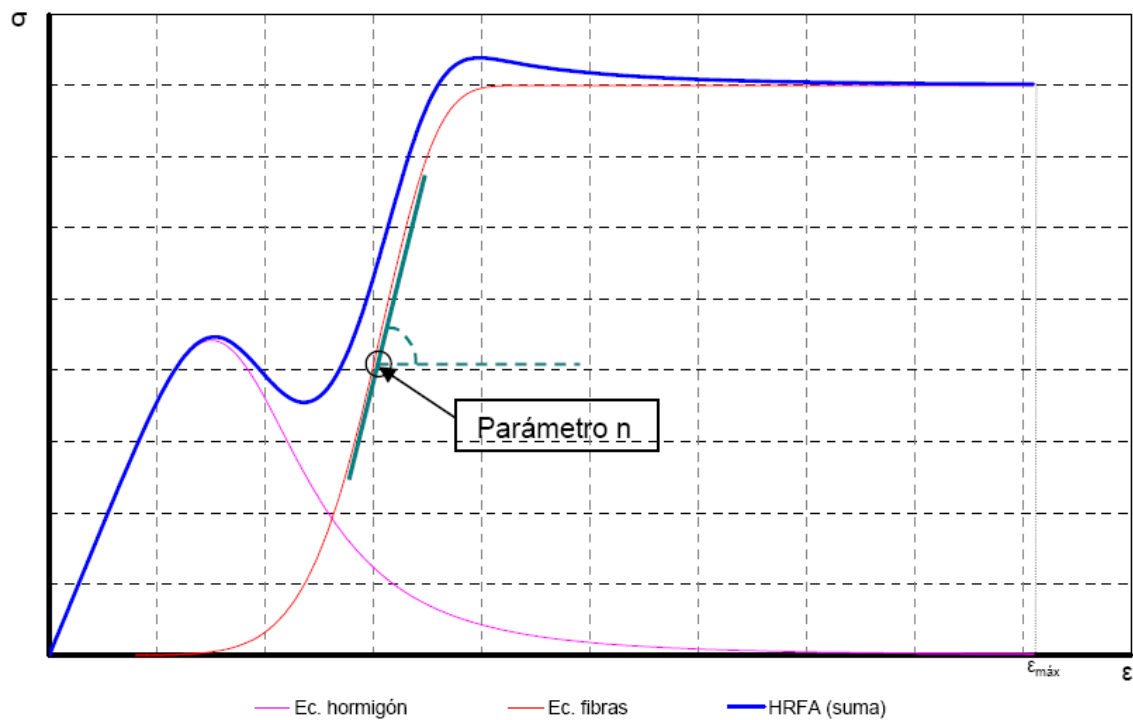


Fig. 4.3.26 Gràfic tensió deformació FRFA [9]

Està directament relacionat amb el % d'aprofitament de la fibra; a més tensió més deformació.

$$n = \alpha \cdot V_f \cdot \frac{E_s}{E_c} \quad [9]$$

On:

α : coeficient d'eficiència espacial.

V_f : quantia volumètrica de fibra (%).

E_s : mòdul d'elasticitat de l'acer (MPa).

E_c : mòdul d'elasticitat del formigó (MPa).

·K i C: Són dos paràmetres que condicionen el inici del punt d'inflexió, relacionat directament en el punt on la matriu transfereix la càrrega a les fibres.

El paràmetre "K" està relacionat a l'eficàcia de les fibres, es pot descriure com un percentatge del paràmetre B:

$$K = \delta \cdot B \quad [9]$$

El paràmetre "C" està relacionat amb el valor de deformació (ε_{\max}) que te la matriu quan arriba a la màxima tracció (f_{ct}), essent "C" superior a aquest valor:

$$K = \delta \cdot \varepsilon_{\max} \quad [9]$$

On:

$$\delta > 1$$

Com es pot observar, l'equació constitutiva del HRFA en fase de post-fissuració, depèn de paràmetres vinculats a les característiques del formigó i de les fibres de reforç, tant variables com tipus de fibres hi ha al mercat.

REFERÈNCIES:

[3] F. Laranjeria, C. Molins, A. Aguado, Comportamiento a tracción de hormigones reforzados con fibras de acero.

[9] L. Coto, Ecuaciones constitutivas para el análisis de secciones de HRFA.

[10] EHE08.

Coefficients de seguretat del material:

En referència als coeficients parcials de seguretat de minoració del material, l'annex 14 de la EHE 08: "Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras", indica que es podem mantenir els mateixos coeficients indicats a la taula 15.3 al entendre que la incorporació de fibres no modifica les incerteses que condueixen a l'estimació d'aquest valors.

Situación de proyecto	Hormigón γ_c	Acero pasivo y activo γ_s
Persistente o transitoria	1,5	1,15
Accidental	1,3	1,0

Fig. 4.3.27 Coeficients parcials de seguretat dels materials per a estats límits últims. [10]

Segons aquest quadre, al formigó s'ha d'aplicar un coeficient de 1,5 i a l'acer 1,15. Com s'ha pogut veure, en situació de **pre-fissuració**, la capacitat resistent del material depèn bàsicament de la matriu de formigó, en aquest cas és lògic aplicar el coeficient de **1,5** per obtenir la tensió de càlcul; per altra banda, en situació de **post-fissuració**, la capacitat resistent del material depèn de les fibres d'acer i la interacció d'aquestes amb el formigó, en aquest cas també és recomanable aplicar el coeficient de **1,5** per obtenir la tensió de càlcul.

Aquest coeficients de seguretat són per a estats límits últims, la norma EHE08 indica que per a **estats límits de servei** el coeficient a aplicar és **1,00** tant per al formigó com per l'acer.

REFERÈNCIES:

[10] EHE08.

4.4 METODOLOGIA DE CÀLCUL: ANÀLISI ELÀSTIC I ANÀLISI PLÀSTIC.

Una de les grans diferències del FRFA amb el formigó armat convencional, donat que les fibres d'acer es troben barrejades amb la massa del formigó amb una disposició aleatòria, és que disposa d'un material homogeni en totes direccions (salvant els efectes de l'orientació preferencial de les fibres en fase de formigonat). Aquest fet fa que es disposi de la mateixa capacitat resistent en qualsevol punt, en contraposició del formigó armat convencional, on es pot dissenyar l'armadura de reforç per a cada punt concret de l'element segons siguin els esforços al que està sotmès.

Aquest fet fa que, en un càlcul elàstic de l'element, la capacitat resistent del HRFA s'hagi de dimensionar per a suportar els esforços al punt més sol·licitat, trobant-se en una situació de sobredimensionament per a la resta de punts, amb el conseqüent desaprofitament del material.

Pel altra banda, com s'ha pogut veure a l'apartat anterior, el comportament a flexió d'una secció de FRFA segueix un comportament elàstic fins l'aparició de la primera fissura i un comportament plàstic en situació de post-fissuració. El comportament plàstic d'una secció (on augmenta la deformació de les fibres sense un increment de capacitat resistent) facilita la formació de ròtules plàstiques, que afavoreixen una redistribució de moments fent que els esforços es reparteixin més fàcilment evitant concentracions de tensions elevades en punts concrets. A elements formats per FRFA, on la capacitat resistent del material és la mateixa en qualsevol punt i direcció, aquest tipus d'anàlisi és especialment recomanable per tal d'aconseguir el màxim rendiment del material.

COMPARATIU DE LA CAPACITAT DE CÀRREGA ENTRE ANÀLISI ELÀSTIC I ANÀLISI PLÀSTIC:

A continuació es presenta un estudi comparatiu de la capacitat de càrrega entre un anàlisi elàstic i un anàlisi plàstic per a diferents plaques en funció de la seva geometria i les condicions de vora. Les plaques analitzades són:

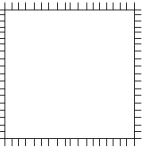
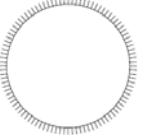
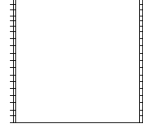



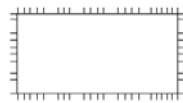

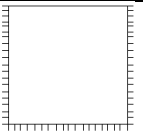
- Placa quadrada de 6,00 x 6,00 m.
- Placa rectangular de 4,00 x 8,00 m.
- Placa circular de \varnothing 6,00 m.

Condicions de vora:

Recolzament 

Encastament 

Al quadre següent es pot veure la relació entre el moment últim (m) i la càrrega màxima (p) per a cada model i tipus d'anàlisi, així com un comparatiu entre la càrrega màxima segons l'anàlisi sigui elàstic o plàstic, On es pot apreciar el increment de càrrega proporcional d'un càlcul plàstic en vers d'un càlcul elàstic.

Tipus de placa	m/p Elàstic	m/p Plàstic	$P_{plàstica}/P_{elàstica}$
 Recolzada a les vores	1,724	1,500	1,15
 Recolzada a les vores	1,500	1,854	1,24
 Encastament a 2 Vores	3,060	2,25	1,36
 Encastament a 2 Vores	1,360	1,000	1,36
 Recolzat a 3 Vores	2,107	1,500	1,40
 Recolzada a 3 vores	3,840	2,667	1,44
 Recolzada a les vores	1,627	1,131	1,44
 Encastament a 1 Vora, recolzament 2 vores.	2,027	1,333	1,52
 Recolzament 3 Vores	3,990	2,546	1,57

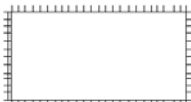

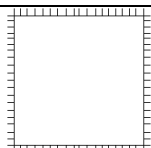
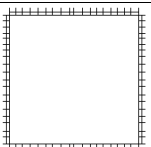
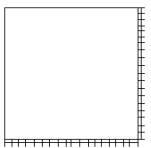
Tipus de placa	m/p Elàstic	m/p Plàstic	$P_{plàstica}/P_{elàstica}$
 Encastament a 1 Vora, recolzament 3 vores.	1,947	1,009	1,93
 Encastament a 2 Vores	6,73	2,77	2,43
 Encastament a 1 Vora, recolzament 3 vores.	3,000	1,226	2,45
 Encastament a 4 Vores	1,847	0,750	2,46
 Encastament a 2 Vores	10,614	3,000	3,54

Fig. 4.4.1 Comparació entre valors elàstics i plàstics de m/p. [18]

INTERPRETACIÓ DE RESULTATS:

Com es pot apreciar, a l'anàlisi plàstic s'obté més capacitat de càrrega per a un moment últim determinat que a l'anàlisi elàstic. Aquest increment pot anar des del 15% fins al 254% de forma estimativa.

Altra dada important és el increment de la diferència entre capacitat de càrrega en l'anàlisi elàstic i l'anàlisi plàstic quan es produeix l'encastament de les vores. Això fa intuir que, en situacions de continuïtat de placa, un anàlisi plàstic obté un millor rendiment del material que un anàlisi elàstic.

REFERÈNCIES:

[18] M. Martínez, Análisis en rotura de placas de hormigón reforzado con fibras de acero.

4.5 CÀLCUL EN SITUACIÓ LÍMIT DE SERVEI I SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIM

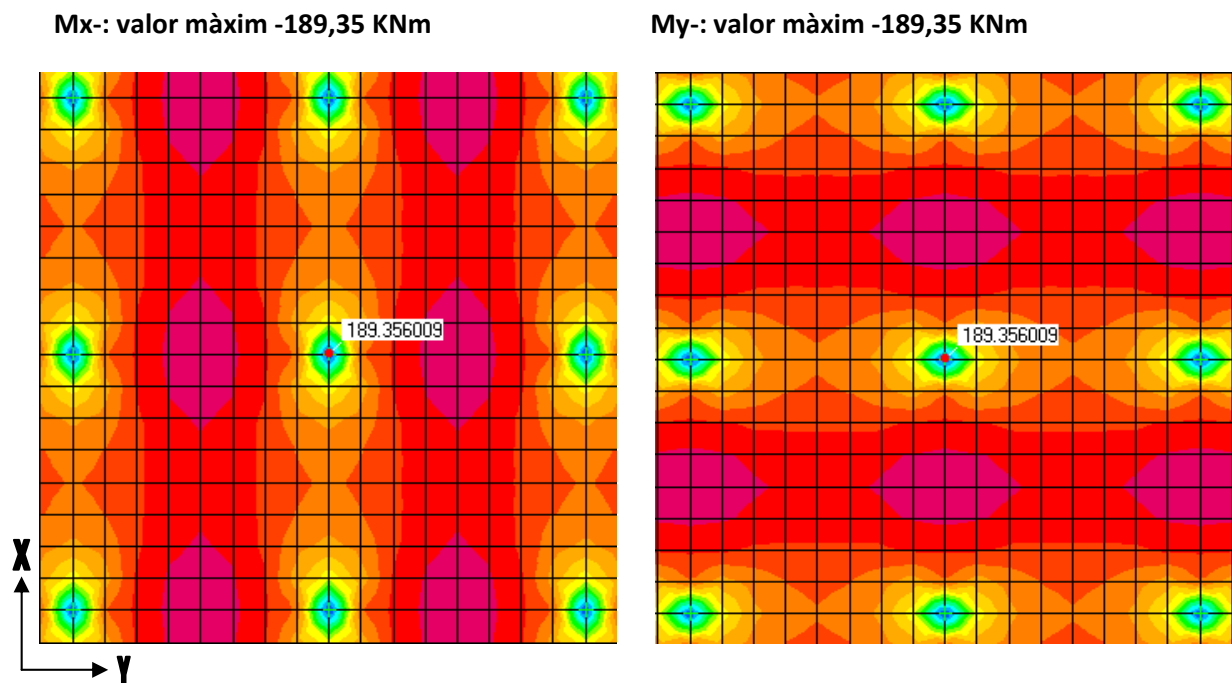
Per altra banda, el càlcul plàstic requereix la formació de ròtules lineals associades a fissuracions del material i deformacions importants, fet que pot ser incompatible amb els requeriments en situació límit de servei. Per aquest motiu pot ser més recomanable un anàlisi elàstic en situació de pre-prefissuració del material (agafant com a $f_{ct,k}$ la capacitat resistent de la matriu sense aplicar coeficients parcials de seguretat del material, ni coeficients de majoració d'accions). D'aquesta forma es garanteix que en situacions normals d'ús el material no patirà ni fissuracions ni deformacions excessives.

Per tal d'optimitzar al màxim les propietats d'un material amb la mateixa capacitat resistent en qualsevol direcció, en contraposició al formigó armat convencional on es disposa l'armadura de forma ortogonal per a simplifications de muntatge, a l'hora de l'obtenció d'esforços aquest hauran de ser els que es produeixen en la direcció de màxim esforç, donat que en armadura disposada ortogonalment la suma de components sempre es major.

-Exemple d'obtenció d'esforços en una llosa continua sobre suports puntuals:

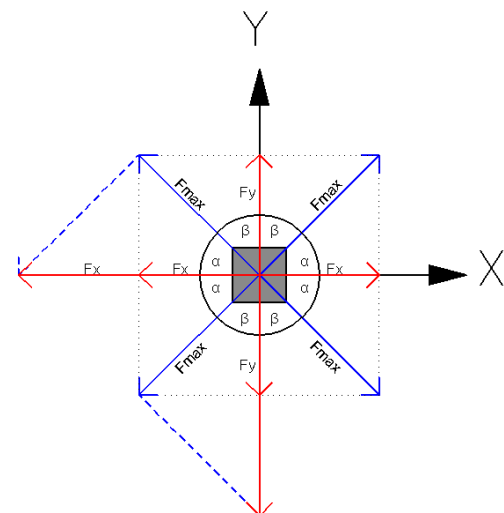
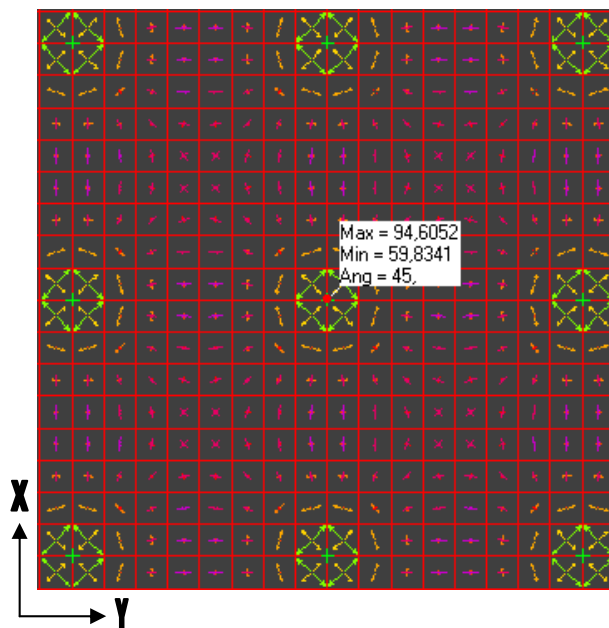
S'analitza, una llosa de 30 cm de gruix amb llums de 8 x 8 m recolzada sobre pilars. Amb un pes propi de 750 kg/m² i una sobrecàrrega de 300 kg/m².

Es modelitza l'estructura amb el programa de càlcul SAP 2.000 mitjançant la discretització de la llosa en elements finits de 1 x 1 m. S'extreuen els resultats dels moments flectors en la direcció "X", en la direcció "Y" i en la direcció corresponent al moment màxim per a cada element finit.



Aquest esforç, convenientment majorats, serien els que servien per dimensionar l'armat de reforç amb armadura passiva convencional disposada ortogonalment segons eixos "X" i "Y".

Mxy: valor màxim -94,60 KNm



$$F_x = \cos \alpha \cdot F_{\max}$$

$$F_y = \sin \alpha \cdot F_{\max}$$

Per altra banda, al disposar d'un material homogeni amb la mateixa capacitat resistent en qualsevol direcció X-Y, sembla lògic utilitzar els esforços màxims, en qualsevol direcció, per tal de dimensionar la secció del forjat i la quantia d'acer, ja que la suma de les components X i Y dona valors molt superiors, amb el conseqüent sobredimensionament del forjat.

4.6 EXEMPLES D'APLICACIONS DE FRFA AMB FUNCIO ESTRUCTURAL.

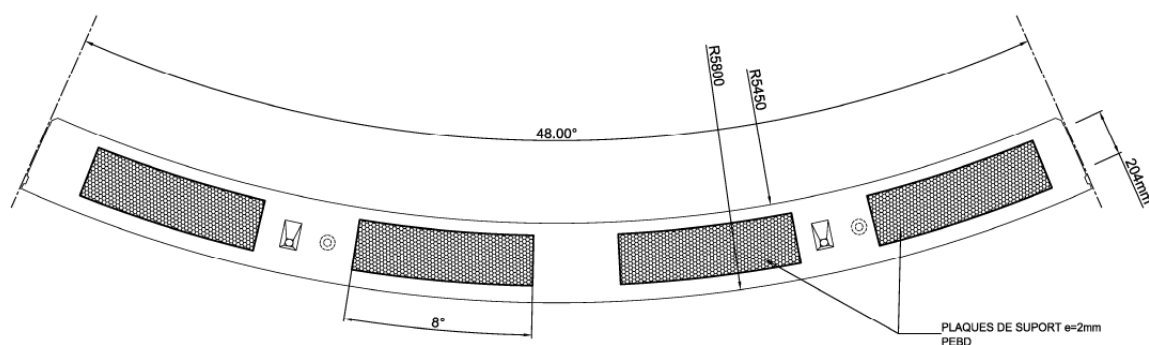
Aplicacions en elements prefabricats de FRFA:

•Dovelles al tram experimental de L9 de metro de Barcelona.

El túnel, de 12 m de diàmetre exterior, s'ha construït mitjançant una tuneladora que a mida que avança va recobrint les parets mitjançant anells troncocònics formats per dovelles de formigó armat.

Les característiques de l'anell són:

Gruix de la dovella	35 cm
Número de dovelles	7+1
Formigó emprat	HA-50
Armadura	Sense armadura passiva
Quantia de fibres	60kg/m ³
Longitud de les fibres	50 mm
Ø de les fibres	1 mm



| MÀSTER UNIVERSITARI TECNOLOGIA A L'ARQUITECTURA-DISENY I ANÀLISI D'ESTRUCTURES ARQUITECTÒNIQUES |
Damián NAVARRO AROCA



Fig. 4.6.2 Formigonat de la dovella. [5]



Fig. 4.6.3 Dovella acabada. [5]

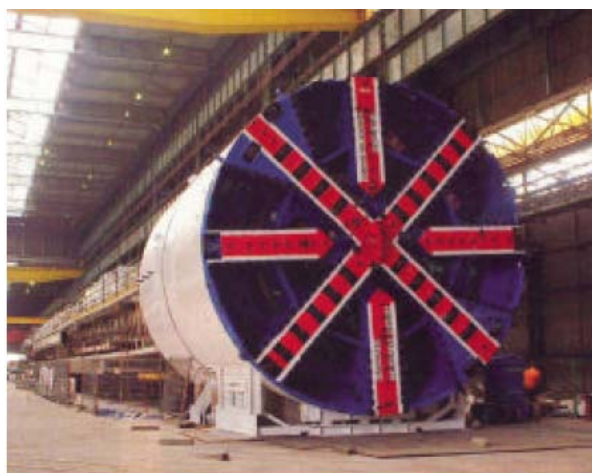


Fig. 4.6.4 Tuneladora i vista interior de túnel. [19]

Els esforços al que estan sotmeses les dovelles són de difícil quantificació, un armat homogeni que treballi de forma similar en totes direccions dona millor resposta a aquestes incerteses. Per altra banda, simplifica el procés de fabricació.

•Tubs de sanejament.

La utilització de fibres com a reforç per a tubs de sanejament simplifica el procés constructiu i no requereix recobriments mínims de l'armadura.



Fig. 4.6.5 Procés de fabricació. [8]



Fig. 4.6.6 Proba de càrrega. [8]

La ductilitat del FRFA permet un bon comportament del element fins i tot en situació de post-fissuració.

Un armat homogeni amb la mateixa capacitat resistent en qualsevol direcció, té un millor comportament front els esforços indeterminats al que està sotmès el tub de sanejament.



Fig. 4.6.7 Línies de trencament. [8]

·Panells de façana.

L'armat mitjançant fibres d'acer suposa certs avantatges:

- Simplificació del procés constructiu.
- Reducció de fissures de retracció.
- Armat multidireccional en zones de concentració de tensions: cantonades, encadellats de connexió, recolzaments...
- No necessitat de recobriments amb la conseqüent possibilitat de reduir gruixos.



Fig. 4.6.8 Panells de façana. [8]

-Exemples d'aplicacions in situ de HRFA:

•Primeres aplicacions: consolidació de túnels i talussos.

Gràcies a poder barrejar les fibres amb el formigó i poder aplicar-ho mitjançant el projectat, la seva utilització "in situ" ha estat molt estesa per a l'estabilització de les parets de túnels i estabilització de talussos.



Fig. 4.6.9 Gunitat de paret de túnel. [6]



Fig. 4.6.10 Gunitat de talús. [6]

•Formes complexes amb baixes sol·licitacions a tracció i flexió.

COBERTA DEL RESTAURANT DE L'OCEANOGRÀFIC DE VALENCIA:

Consisteix en una volta nervada formada per vuit lòbuls amb simetria radial, recolzat en nervis radials i amb vora lliure (sense nervi de rigidització).

La llum dels arcs formats per els nervis és de 35,1 m, l'alçada a la clau és de 7,76 m i la vora en voladís és de 12,27 m. El gruix bàsic de la coberta és de 6 cm.

Armadura convencional # 15x15 Ø8.8

Quantia de fibres: 50 kg/m³ amb formigó projectat.



Fig. 4.6.11 Encofrat de coberta. [6]



Fig. 4.6.12 Aplicació FRFA mitjançant projectat. [6]



Fig. 4.6.13 Estructura de la coberta . [6]

MUR DEL PASSEIG MARÍTIM DE BENIDORM:

Consisteix en un mur de 4 m d'alçada i 1.300 m de longitud, amb forma sinuosa de doble curvatura, la dificultat d'armat va fer aconsellable la utilització de FRFA sense armadura passiva convencional.

Quantia de fibres: 50 kg/m³ amb formigó projectat.

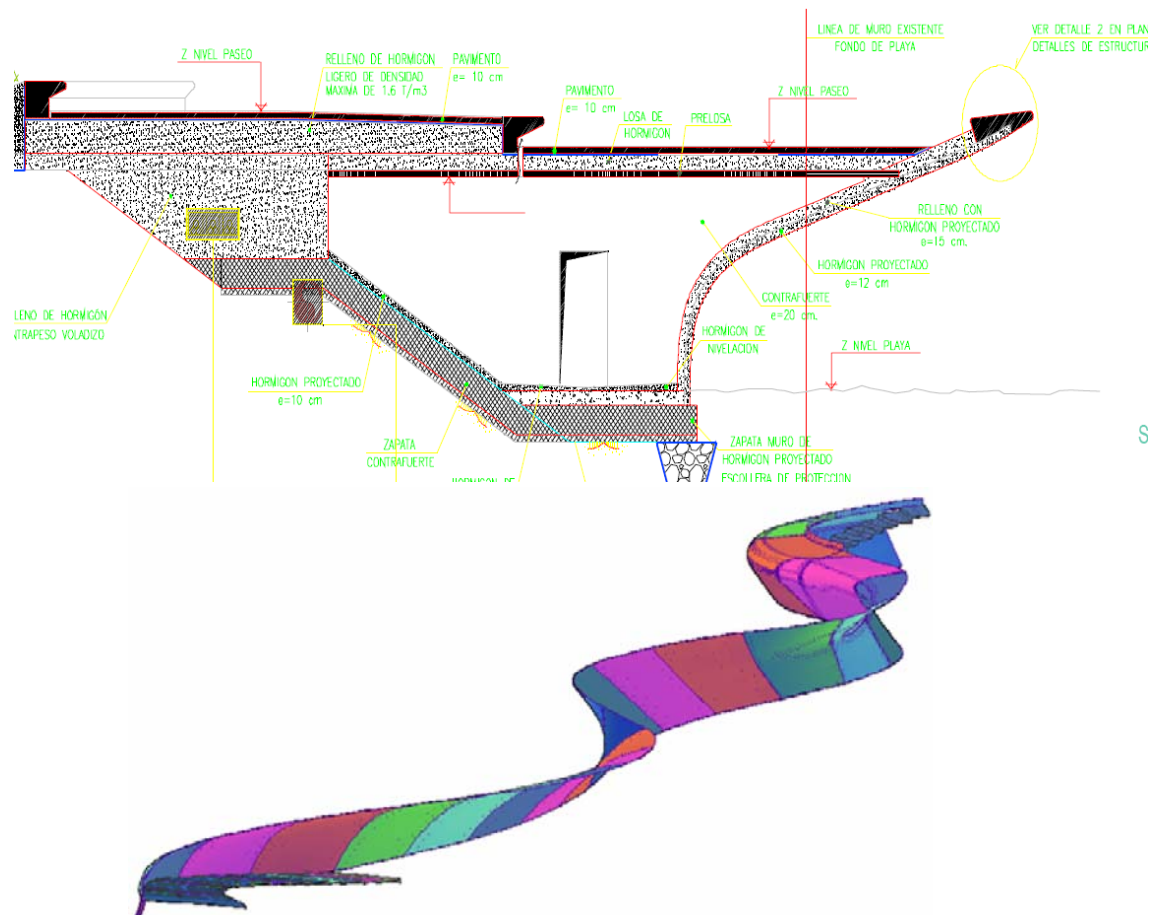


Fig. 4.6.14 Secció i perspectiva del mur. [6]

·Aplicacions en obres de rehabilitació.

REHABILITACIÓ DE L'EDIFICI MARLASCA DE SABADELL:

Consisteix en la rehabilitació d'una nau industrial, on es aplicar HRFA a la rehabilitació del forjat, on es van deixar les biguetes metàl·liques per tal que contribuïssin a la capacitat resistent, a fonaments i murs de contenció (de 60cm de gruix i 4 m d'alçada).

Quantia de fibres: 80 kg/m³ per al forjat (amb biguetes metàl·liques).

80 kg/m³ per a fonamentació.

60 kg/m³ per a mur de contenció.



Fig. 4.6.15 Façana del edifici. [6]



Fig. 4.6.16 Formigonat deñ forjat amb FRFA. [6]

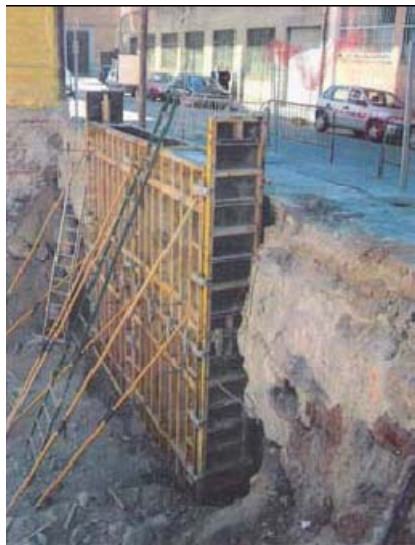


Fig. 4.6.17 Mur de contenció. [6]



Fig. 4.6.18 Fonamentació. [6]

·Aplicacions en forjats.

ASSAIG A ESCALA REAL DE TREFILARBED BISSEN S.A. EN LUXEMBURGO:

Al 2.004 es construeix una llosa de HRFA sobre pilars metàl·lics, per tal de assajar la capacitat resistent d'aquest tipus de lloses. Els assajos de càrrega es van fer per a situacions normals d'ús i per a trencament de la llosa.

Característiques de la llosa:

Dimensions:	18,30 x18,30 m amb suports verticals aïllats cada 6,00 m.
Gruix de la llosa:	20 cm.
Tipus de Formigó:	C30/37
Tipus de fibra:	TABIX 1.3/50
Quantia de fibra:	100 kg/m ³ (20kg/m ²)
Armadura conv.:	3Ø16 en la part inferior en les línies de pilars.

L'armadura convencional segueix els criteris de la norma Canadenca, "Desing of concrete structures buildings", on es requereix la disposició d'una armadura de penjat capaç de resistir els esforços de membrana en cas de col·lapse de la llosa.

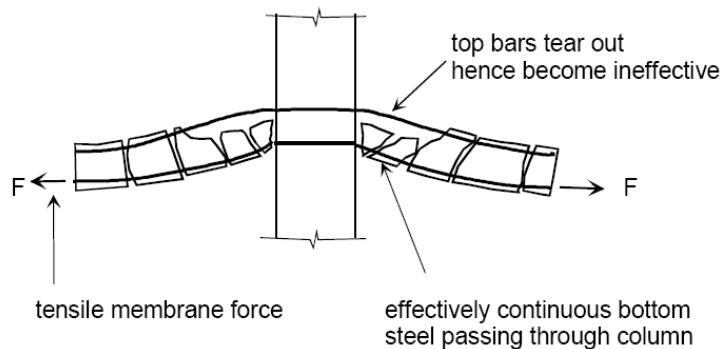


Fig. 4.6.19 Armadura de penjat. [20]



Fig. 4.6.21 Vista de la llosa. [20]

Del trencament de pobretes a 28 dies, s'han obtingut els següents resultats:

Resistència a Compresió $F_{c,m} = 63,9 \text{ MPa} \rightarrow F_{ck} = 44,6 \text{ MPa}$
 Resistència a Tracció a flexió $F_{ct,m} = 9,20 \text{ MPa} \rightarrow F_{ck} = 6,44 \text{ MPa}$

Aquest valors de tracció és superior al que es podria obtenir aplicant la fórmula indicada a la EHE08 ($f_{ct,k,fl} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot 44,6^{2/3} \cdot (1,6 - h/1.000)$; MPa= 3,70 MPa), cosa que fa pensar que el ciment utilitzat augmenta les propietats mecàniques a tracció del formigó.

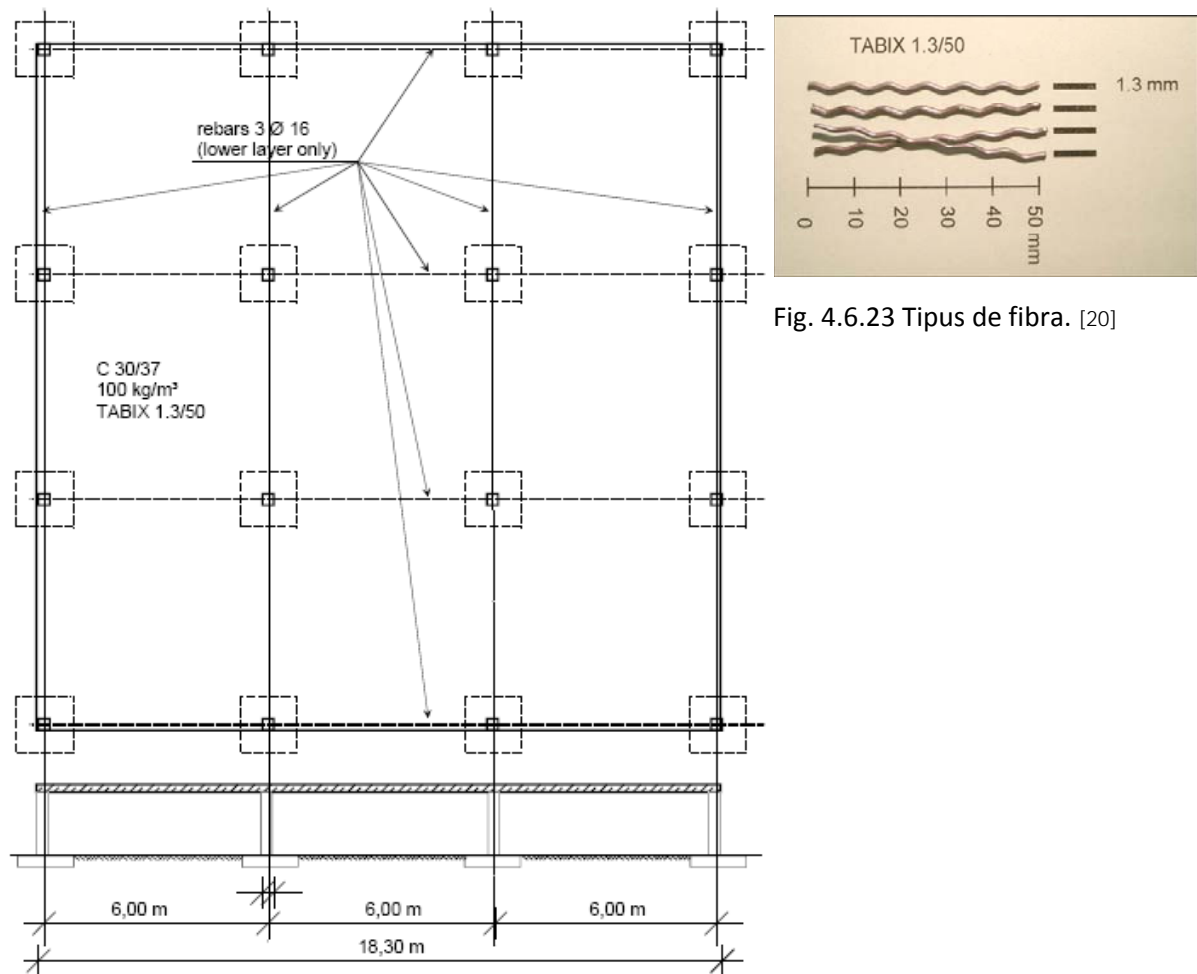


Fig. 4.6.23 Tipus de fibra. [20]

Fig. 4.6.22 Esquema en planta de la llosa. [20]



Fig. 4.6.24 Posta en obra del FRFA. [20]

Proves de càrrega realitzades:

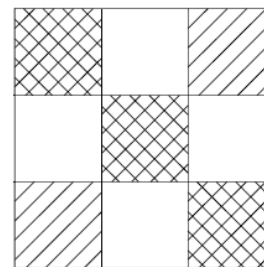
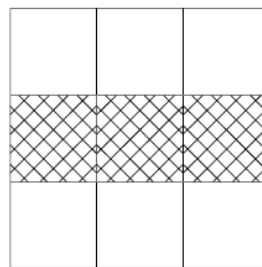
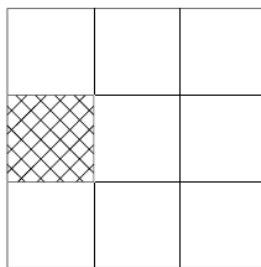
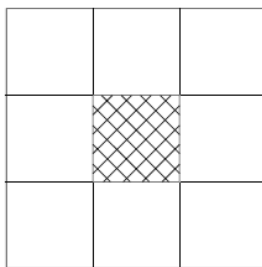
LC 1
centre field

LC 2
edge field

LC 3
centre strip

LC 4
checkered

each loaded field contains 24 containers à 1 m³



	UDL-LC 1	UDL-LC2	UDL-LC3	UDL-LC4
load pattern	centre	edge	centre line	checkered
max. life load	6.00 kN/m ²	3.50 kN/m ²	3.50 kN/m ²	3.50 kN/m ²



Fig. 4.6.25 Proba de càrrega superficial. [20]

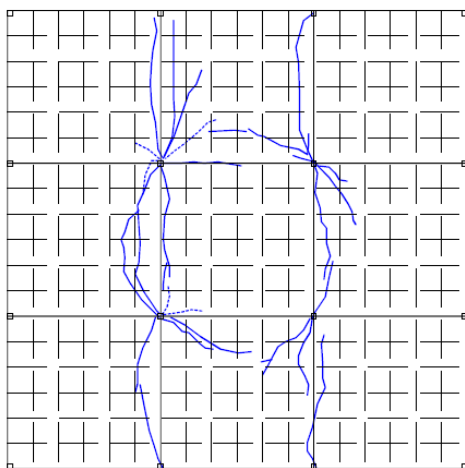
Durant la realització de les proves de càrrega és va constatar un comportament elàstic del material, amb aparició de petites fissures de poca importància.

Donat el resultat satisfactori de les proves de càrrega es van dur a terme altres proves per dur al límit l'estructura.

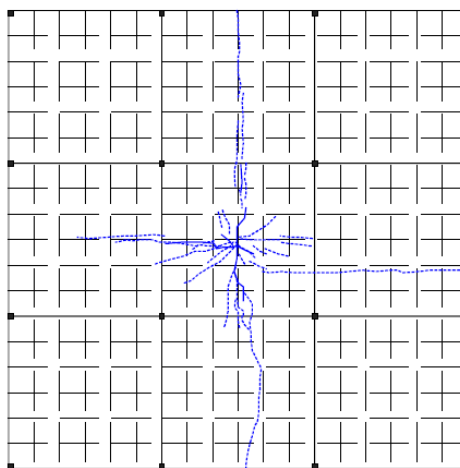


Fig. 4.6.26 Proba de càrrega puntual. [20]

La màxima càrrega aplicada a la zona central va ser de 462,3 KN, corresponent a 25,68 KN/m², amb una fletxa total de 51,4 mm.



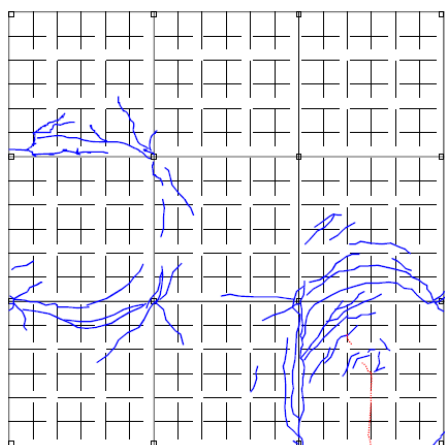
-Línies de trencament cara superior.



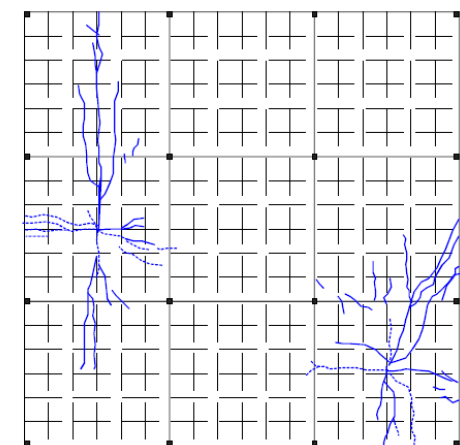
-Línies de trencament cara inferior.

La màxima càrrega aplicada al tram central de la vora va ser de 261,1 KN, corresponent a 14,50 KN/m², amb una fletxa total de 50,4 mm.

La màxima càrrega aplicada al tram de cantonada va ser de 213,8 KN, corresponent a 11,87 KN/m², amb una fletxa total de 48,15 mm.



-Línies de trencament cara superior.



-Línies de trencament cara inferior.

SEU PER A LKS A MONDRAGON (tesis doctoral Aitor Maturana):

Edifici destinat a les oficines de LKS, consta de planta soterrani, planta baixa i quatre plantes pis. En aquest projecte gran part de l'armadura convencional es substituïda per fibres d'acer.

Característiques de la llosa:

Dimensions:	33 x20m amb suports verticals aïllats cada 8,00x8,00 m.
Gruix de la llosa:	30 cm.
Tipus de Formigó:	HA-30 ($f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$)
Tipus de fibra:	TABIX 1.3/50
Quantia de fibra	100 kg/m ³ (30kg/m ²)
Armadura conv.:	reforços puntuals a zones específiques.
Armadura de Penjat:	3Ø25 en la part inferior en les línies de pilars.

L'armadura de penjat con armadura addicional de seguretat per resistir els esforços de membrana en cas de col·lapse de la llosa.

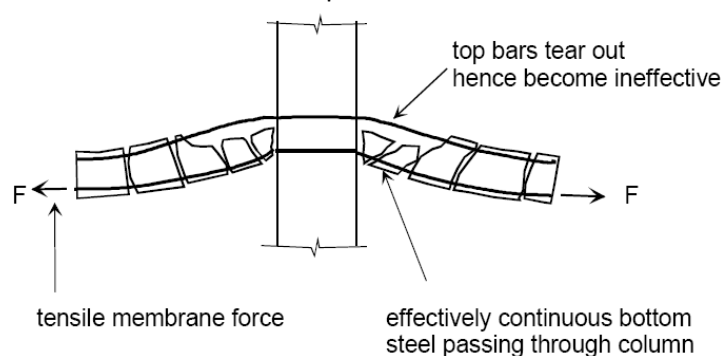


Fig. 4.6.27 Armadura de penjat. [20]



Fig. 4.6.28 Façana del edifici. [12]

En el càlcul de la llosa, la capacitat resistent de FRFA no es suficient per tal de suportar tots els esforços al que està sotmès, per aquest motiu es planteja la col·locació d'armadura convencional a efectes de reforçar les zones amb més sol·licitacions:

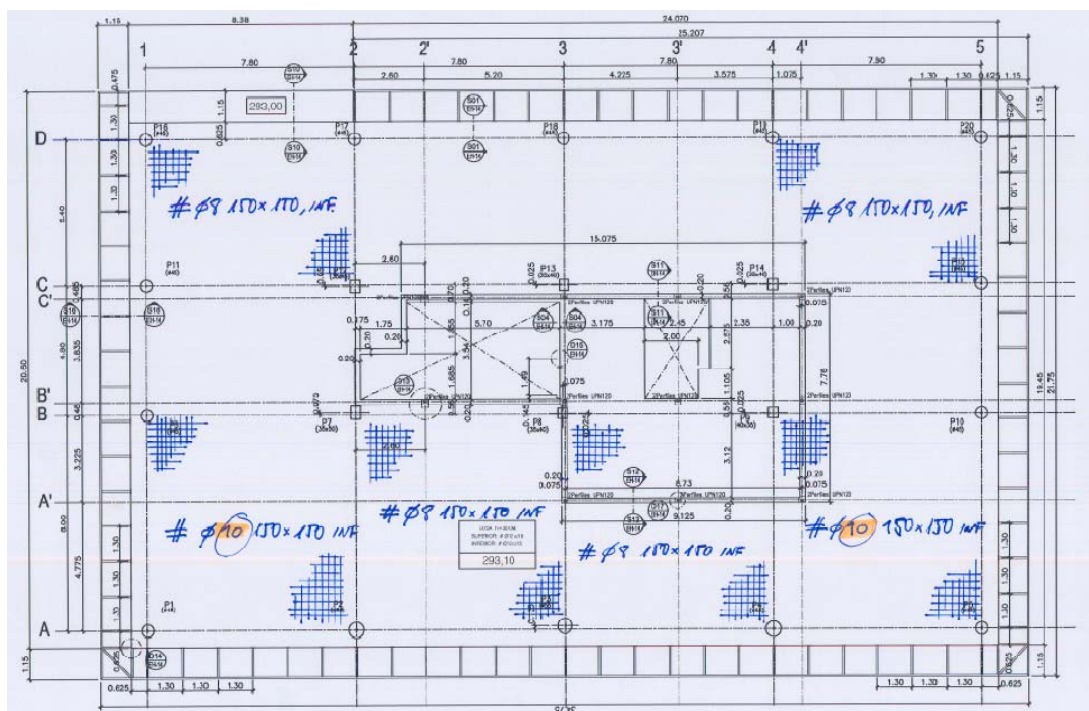


Fig. 4.6.29 Reforç de moment positiu en vano de cantonada. [12]

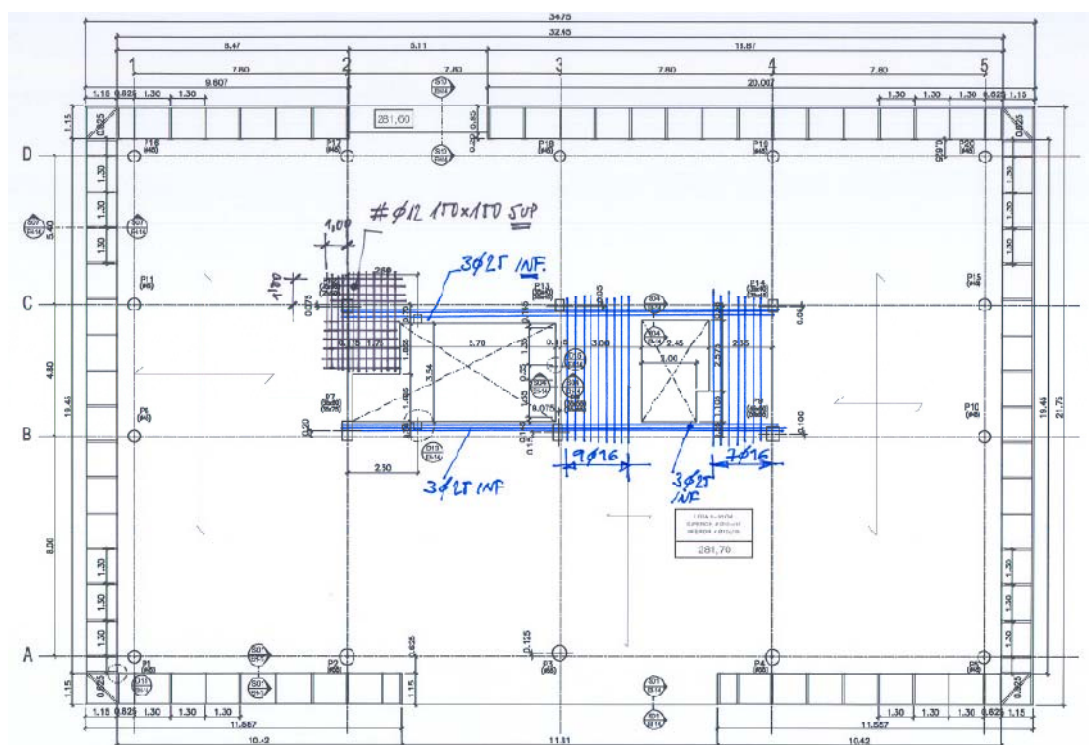


Fig. 4.6.30 Reforç de zona adjacent a forats per elements de comunicació vertical i inst. [12]

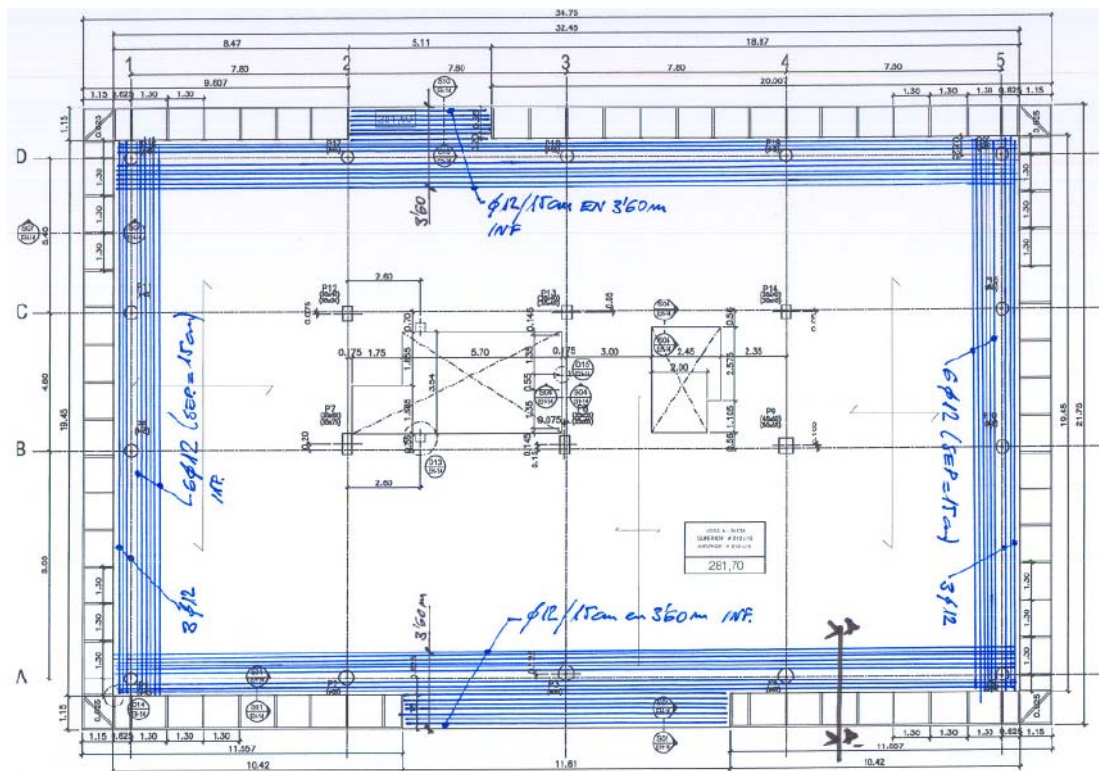


Fig. 4.6.31 Reforç a vores lliures amb càrrega de façana. [12]

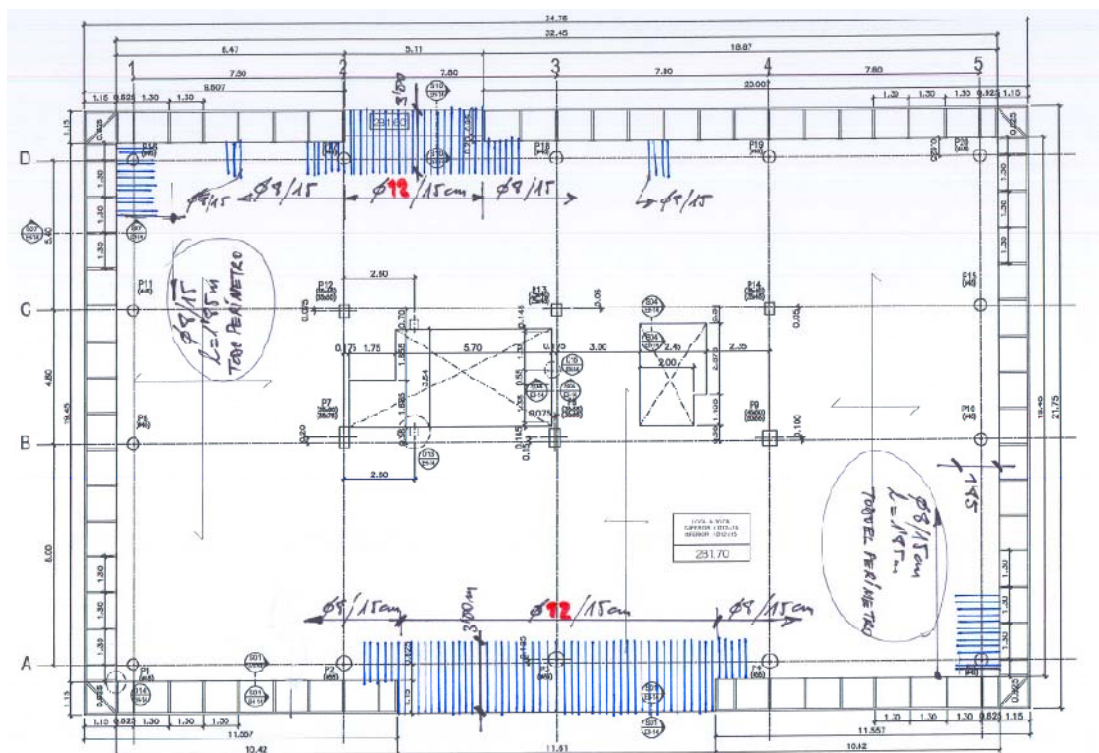


Fig. 4.6.31 Reforç de voladís. [12]

- Reforç a zona de canvi de nivell de forjat (degut a la necessitat de vibrat).
- Reforç de zona d'encastament entre mur de soterrani i forjat.

Per tal de justificar en termes econòmics l'elecció de FRFA en front el formigó armat convencional, s'ha realitzat un comparatiu entre la solució inicial i la final, constatant que a part de la reducció de temps en fase d'execució, la solució amb HRFA és més econòmica.

	SOLUCIÓN INICIAL	SOLUCIÓN HRFA	SOLUCIÓN HRFA + APC
Cuantía Armadura Pasiva	109 kg/m ³ (32,7 kg/m ²)	15 kg/m ³ (4,5 kg/m ²)	33 kg/m ³ (9,9 kg/m ²)
Dosificación fibras	-----	100 kg/m ³ (30 kg/m ²)	100 kg/m ³ (30 kg/m ²)
COSTE ECONÓMICO	100 %	85,9 %	89 %

Fig. 4.6.32 Quadre comparatiu de cost econòmic. [12]

Es pot veure com l'aplicació del FRFA, combinat, o no, amb APC, segueix essent més econòmic que la solució de formigó armat convencional. La simplificació de la posta en obra compensa el increment de la quantia d'acer.

REFERÈNCIES:

- [5] A. Aguado, Tendencias en los hormigones con fibras.
- [6] P. Serna, Jornada sobre aplicaciones estructurales de hormigón con fibras.
- [8] A. De la Fuente, J. Armengou, Jornada sobre aplicaciones estructurales de hormigón con fibras.
- [12] A. Maturana, Tesis doctoral.
- [19] A. Aguado, Avances en tecnología del Hormigón en construcción subterránea.
- [20] ARCELOR, Development of steel fiber reinforced concrete flat slab.
- [21] c. Camós, Determinació del coeficient parcial de seguretat a aplicar al formigó reforçat amb fibres d'acer sotmés a tracció.

5. VIABILITAT DE L'ESTUDI.

Com s'ha pogut comprovar en els dos últims exemples d'utilització de FRFA en forjats unidireccionals (assaig a escala real de TREFILARBED a Luxemburgo i la seu de LKS a Mondragón), l'aplicació de FRFA per a forjats bidireccionals amb llosa massissa és viable. No obstant, mentre que per a l'assaig de TREFILARBED per a una llosa de 20 cm de gruix i llums de 6 x 6 m els resultats han sigut clarament satisfactoris, per a l'edifici de la Seu de LKS amb llosa de 30 cm i llums màximes de 8 x 7,8 m, els resultats no són tan òptims com al cas de TREFILARBED, donat que es fa necessari armadura convencional de reforç addicional a certs punts on el moment residual últim de la secció, només amb fibres, no és suficient per suportar els esforços. Aquest tema es podria solucionar amb un cantell major de la llosa o una quantia superior d'armadura (limitada per les condicions de treballabilitat del formigó).

Potser ens trobem en un punt on les llums considerades (8 x 8 m) ja comencen a estar al límit d'aplicació del FRFA amb llosa de formigó amb gruixos proporcionats.

Donat que les exigències del mercat demanen anar cada cop més a llums més grans per donar més flexibilitat als espais, el criteri purament econòmic no serà suficient per introduir aquest material com una alternativa real al formigó armat convencional. Per aquest motiu, en aquesta tesina es proposa investigar sobre l'aplicació del FRFA en altres sistemes constructius que permetin arribar a llums superiors als 8 x 8 m amb un millor aprofitament del material.

La solució més immediata és la utilització de forjats amb menys pes propi on l'àrea de la secció es concentri en la cara superiors i inferiors, per tal de obtenir el màxim rendiment del material a les zones on les tensions normals siguin majors, sense perdre inèrcia bruta de la secció.

Per altra banda, en contraposició al formigó armat convencional, l'armadura de reforç es troba dispersa en la massa de la matriu donant tensions admissibles de tracció reduïdes en comparació a les tensions sobre l'armadura convencional, de forma que per aconseguir capacitat resistent a flexió, l'àrea de FRFA en tracció haurà de ser considerable.

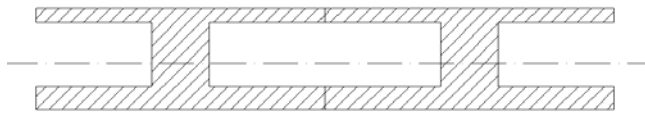
També s'ha de tenir en compte la isotropia del material, capaç de treballar igual en qualsevol direcció, de forma que la nova tipologia constructiva aprofiti aquesta propietat i defugui de la distribució ortogonal X-Y dels elements resistents, fruit de simplificacions constructives del formigó armat convencional.

Per tots aquest motius, en una intuïció preliminar, es considera que la tipologia de forjat sandvitx amb nucli de poliestirè és el que millor es pot adaptar a aquest material, presentant certs avantatges i inconvenients respecte a la llosa massissa.

-AVANTATGES:

- Menys pes propi a igual inèrcia bruta de la secció (amb un increment del cantell total al forjat sandvitx respecte a la llosa massissa); donat la diferència substancial en el comportament a tracció en front a la compressió del FRFA, el gruix de les capes es pot dimensionar per extreure un millor rendiment a les propietats del material (optimització del material).

SANDVITX

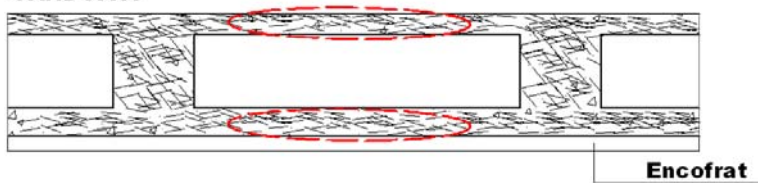


LLOSA

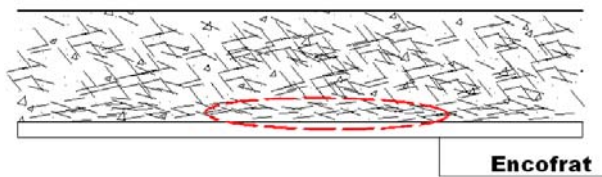


·Orientació preferent en el pla X-Y per l'efecte paret al disposar dues capes de molt menys gruix que una llosa massissa, cosa que millora el rendiment de les fibres.

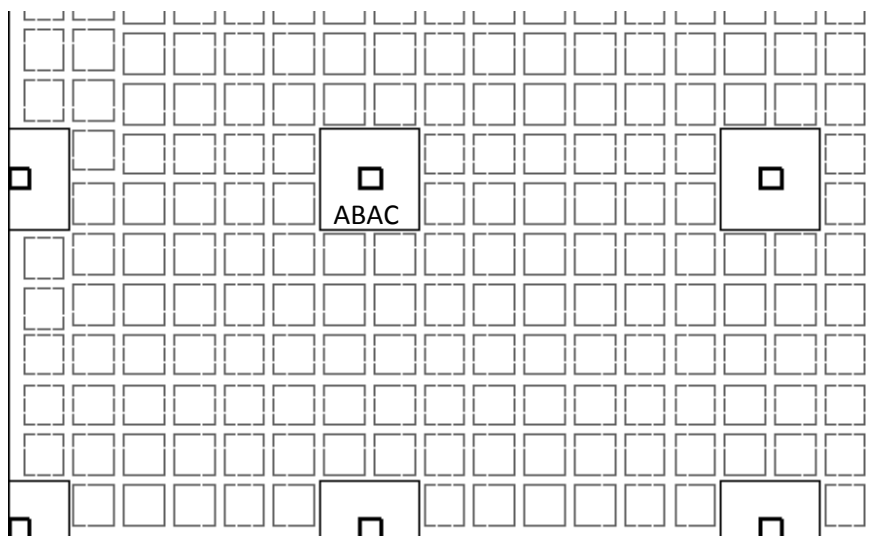
SANDVITX



LLOSA

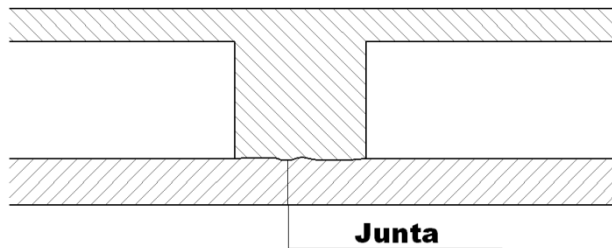


·En lloses continues sobre suports, els moments màxims es produeixen sobre els pilars interiors, donat que en un forjat sandvitx serà necessària la disposició d'àbacs (zones massisses), es disposarà d'una secció bruta major als punts on les sol·licitacions són màximes.



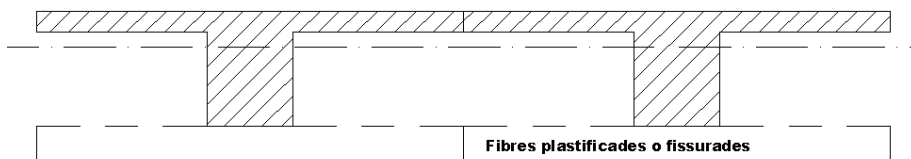
-INCONVENIENTS:

·El procés constructiu necessitarà de dues fases de formigonat, podent ocasionar juntes de formigonat que redueixin la resistència a rasant de la secció (pot ser necessari la col·locació de connectors).

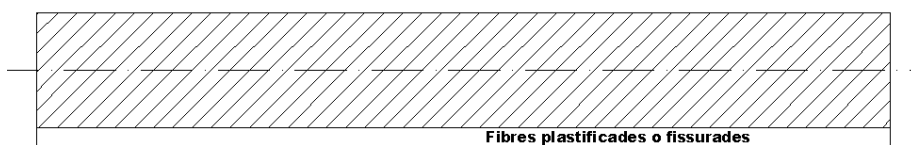


·Intuïtivament s'interpreta que la formació de ròtules plàstiques serà més favorable en un forjat Sandvitx que en una llosa massissa, donat que la plastificació (o fissuració) de les fibres més externes, debiliten més la capacitat resistent del forjat. Això afavoreix una millor redistribució d'esforços, per altra banda la pèrdua de capacitat resistent de la secció fa que el moment resistent residual sigui menor, disminuint la capacitat de càrrega.

SANDVITX



LLOSA



Inèrcia secció residual Sandvitx << Inèrcia secció residual Llosa.

Aquest últim punt s'haurà de contrastar amb assajos reals per determinar si la facilitat de formació de ròtules plàstiques compensa la baixada de resistència residual.

5.1 COMPARACIÓ COMPORTAMENT ELÀSTIC I PLÀSTIC ENTRE LLOSA MASSISSA I FORJAT SANDVITX:

A falta d'assajos que puguin donar valors de resistències del FRFA tant en situació de pre-fissuració o post-fissuració, s'agafaran el valor indicats als càlcul de la Seu de LKS a Mondragón:

Situació de servei:

$$F_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ct,k,fl} = 5 \text{ N/mm}^2$$

Situació límit última:

$$F_{cd} = (30 \text{ N/mm}^2)/1,5 = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ctR,d} = (2,2 \text{ N/mm}^2)/1,5 = 1,47 \text{ N/mm}^2$$

No obstant, cal remarca que crida l'atenció l'elevada resistència a flexotracció obtinguda de 5 N/mm² per a un formigó de 30 N/mm² de resistència característica a compressió, si ho considerem amb els valors obtinguts al aplicar les fórmules de la EHE 08. Això fa intuir que s'estan fent servir ciments que sense augmentar la resistència a compressió del formigó aconseguixen un millor comportament a tracció.

També cal indicar que el valor residual de tracció per al FRFA és vàlid per a seccions massisses. Per no disposar d'assajos que puguin facilitar valors per a seccions alleugerides aquest valor també s'entendrà com a vàlid per a la secció de forjat sandvitx, prenen les reserves pertinents respecte els resultats obtinguts.

	Formigó HRFA (Quantia 100kg/m ² TABIX)					Arm. P.C. Acer B500	
	$F_{c,k}$ (N/mm ²)	$F_{c,d}$ (N/mm ²)	$F_{ct,k}$ (N/mm ²)	F_{ctR} (N/mm ²)	$F_{ctR,d}$ (N/mm ²)	F_y (N/mm ²)	$F_{y,d}$ (N/mm ²)
Característiques dels materials	30,00	20,00	5,00	2,20	1,47	500,00	434,78

CARACTERÍSTIQUES DELS FORJATS CONSIDERATS:

Donat que el punt de partida és la Seu de **LKS**, el primer forjat a analitzar, per tal d'extreure resultats, per a comparar amb els obtinguts a les diferents tipologies i valorar la viabilitat de la utilització del forjat tipus sandvitx, serà la llosa massissa de **30 cm de gruix**.

Per determinar el cantell del forjat **sandvitx** equivalent a la llosa massissa de 30 cm, s'ha considerat un cantell total de **35 cm**, amb el qual s'analitzaran tres forjats sandvitx jugant amb el gruix del nucli de poliestirè i el gruix de la capa inferior. Al primer es considerarà una secció simètrica 10+15+10 cm al segon i tercer secció asimètrica de 5+20+10 cm i de 5+15+15 cm.

Per altra banda també s'analitzarà la **llosa massissa de 35 cm** per a les zones massissades del forjat sandvitx.

Es considerarà **tres situacions d'armat**: només fibres, fibres més APC #15x15cm 8.8 i fibres més APC #15x15cm 10.10.

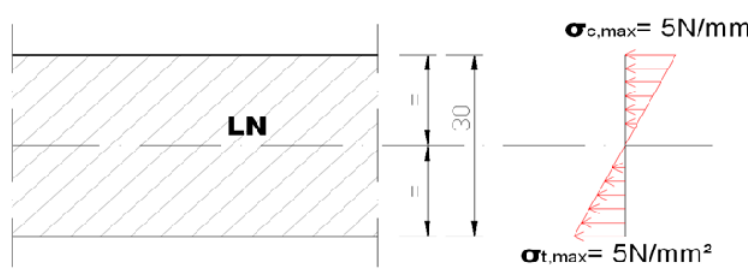
Per altra banda també s'analitzarà la **llosa massissa de 35 cm** per a les zones massissades del forjat sandvitx.

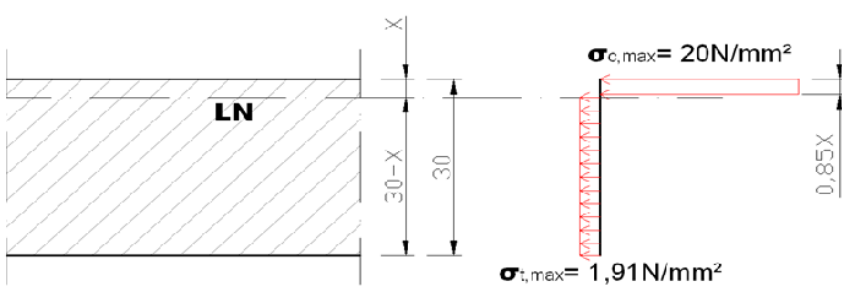
Tant en regim elàstic com en regim plàstic s'ha considerat que es compleix les hipòtesis de Navier, en la que la deformació de les fibres és directament proporcional a la distancia d'aquesta a la línia neutra.

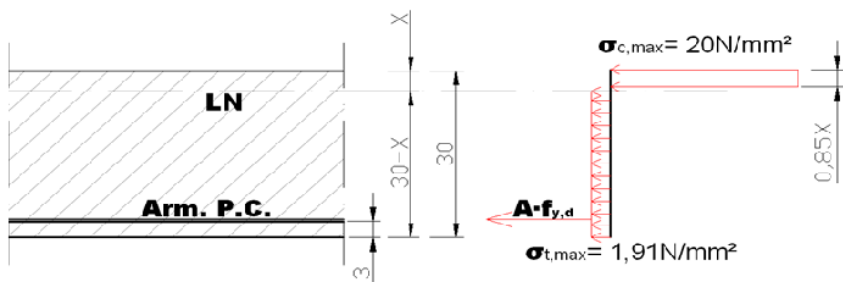
Per al càlcul en regim plàstic de la secció de llosa massissa s'ha aplicat la simplificació de considerar la plastificació total de la secció amb blocs rectangulars de tensions, tant de compressió com de tracció, mentre que per a secció sandvitx només s'ha considerat la plastificació de les fibres traccionades, amb un comportament elàstic de la zona comprimida.

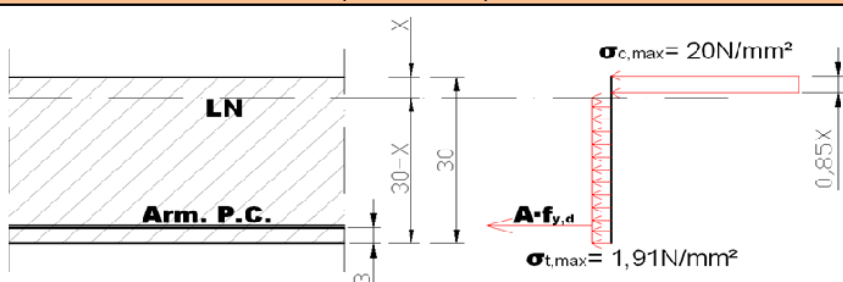
Per al càlcul de la posició de la línia neutra, s'ha aplicat la condició d'equilibri entre forces dels blocs de tracció i compressió.

LLOSA MASSISSA DE 30 cm:

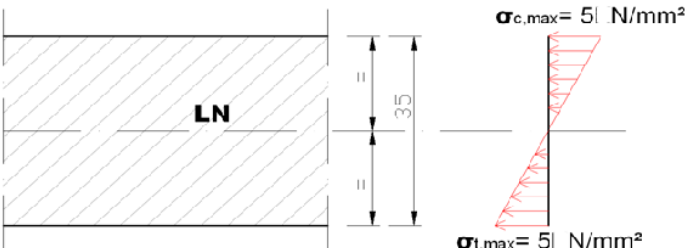
LLOSA 30cm									
SITUACIÓ DE SEVEI (CÀLCUL ELÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	I _{elàstica} (cm ⁴)	W _x (inf) (cm ³)	W _x (sup) (cm ³)	M _{elàstic} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
15,00	15,00	15,00	225.000,00	15.000,00	15.000,00	7,50	5,00	5,00	750,00
									Quantia Fibres kg/m²
									30,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m²
									30,00

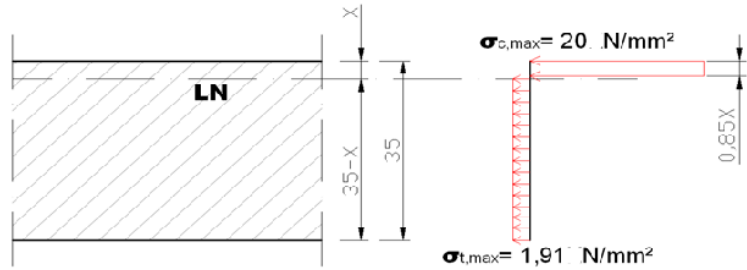
TIPUS DE FORJAT									
LLOSA 30cm									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acer} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
3,03	26,97	3,03	0,00	2,58	26,97	7,84	20,00	1,91	750,00
									Quantia Fibres kg/m²
									30,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m²
									30,00

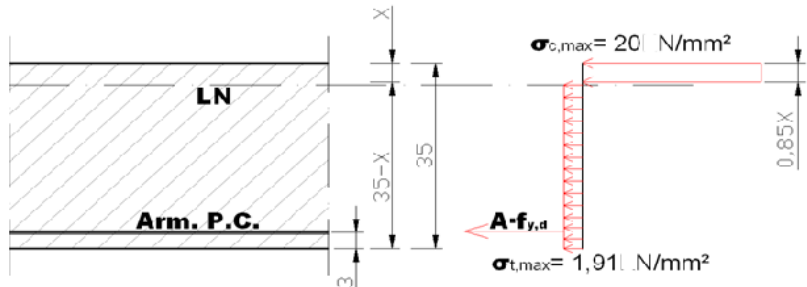
TIPUS DE FORJAT									
LLOSA 30cm									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø8.8									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
3,64	26,36	3,64	2,67	3,10	26,36	12,17	20,00	1,91	750,00
									Quantia Fibres kg/m²
									30,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									5,33
									Quantia Total acer kg/m²
									35,33

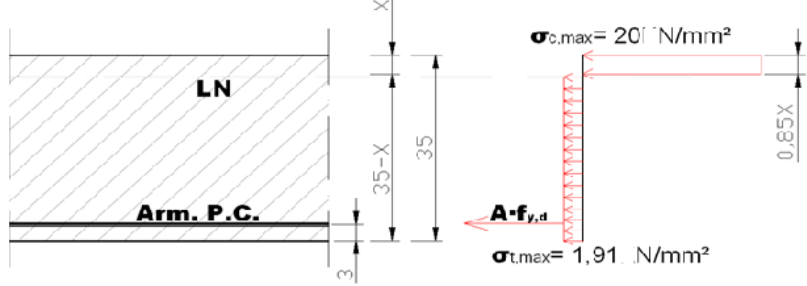
TIPUS DE FORJAT									
LLOSA 30cm									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø10.10									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
4,24	25,76	4,24	5,27	3,60	25,76	16,26	20,00	1,91	750,00
									Quantia Fibres kg/m²
									30,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									8,27
									Quantia Total acer kg/m²
									38,27

LLOSA MASSISSA DE 35 cm:

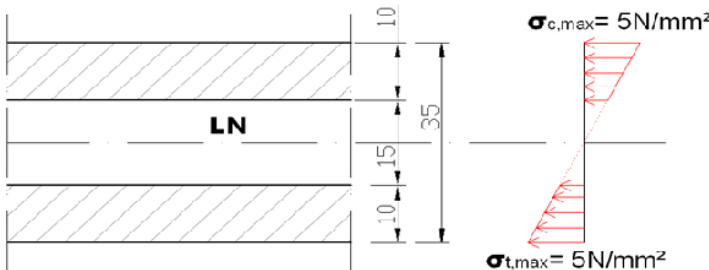
TIPUS DE FORJAT									
LLOSA 35cm									
SITUACIÓ DE SEVEI (CÀLCUL ELÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	I _{elastica} (cm ⁴)	W _{el(inf)} (cm ³)	W _{el(sup)} (cm ³)	M _{elàstic} (Tm/ml)	σ _{comp.} (N/mm ²)	σ _{trac.} (N/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
17,50	17,50	17,50	357.291,67	20.416,67	20.416,67	10,21	5,00	5,00	875,00
									Quantia Fibres kg/m ²
									35,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									35,00

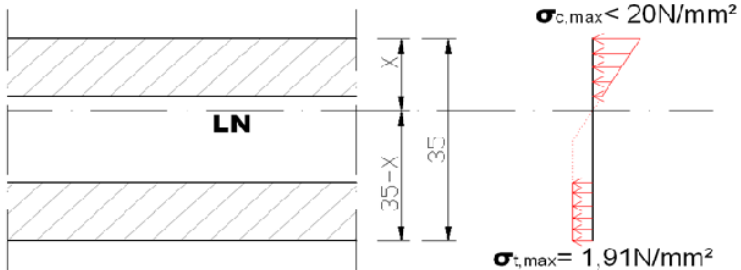
TIPUS DE FORJAT									
LLOSA 35cm									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm ²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (N/mm ²)	σ _{trac.} (N/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
3,54	31,46	3,54	0,00	3,00	31,46	10,68	20,00	1,91	875,00
									Quantia Fibres kg/m ²
									35,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									35,00

TIPUS DE FORJAT									
LLOSA 35cm									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø8.8									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm ²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (N/mm ²)	σ _{trac.} (N/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
4,15	30,85	4,15	2,67	3,53	30,85	15,79	20,00	1,91	875,00
									Quantia Fibres kg/m ²
									35,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									5,33
									Quantia Total acer kg/m ²
									40,33

TIPUS DE FORJAT									
LLOSA 35cm									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø10.10									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm ²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (N/mm ²)	σ _{trac.} (N/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
4,75	30,25	4,75	5,27	4,03	30,25	20,65	20,00	1,91	875,00
									Quantia Fibres kg/m ²
									35,00
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									8,27
									Quantia Total acer kg/m ²
									43,27

FORJAT SANDVITX 10+15+10 (35cm):

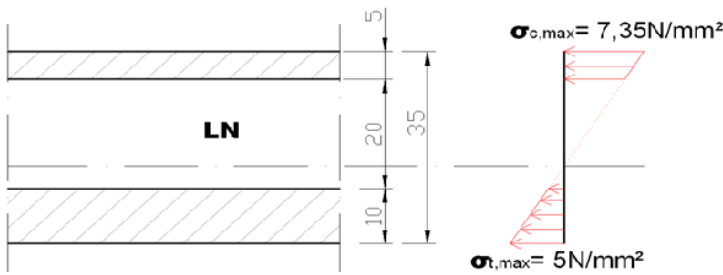
TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 10+15+10 (35cm)									
SITUACIÓ DE SERVEI (CÀLCUL ELÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{int} (cm)	d _{sup} (cm)	I _e (cm ⁴)	W _e (inf) (cm ³)	W _e (sup) (cm ³)	M _{residua} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm ²)	σ _{trac.} (KN/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
17,50	17,50	17,50	329.166,67	18.809,52	18.809,52	9,40	5,00	5,00	620,67
									Quantia Fibres kg/m ²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									24,83

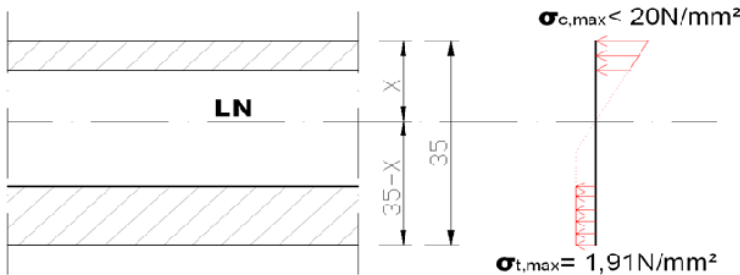
TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 10+15+10 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{int} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acer} (cm ²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residua} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm ²)	σ _{trac.} (KN/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
12,50	22,50	12,50	0,00	10,00	10,00	4,78	1,91	1,91	620,67
									Quantia Fibres kg/m ²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									24,83

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 10+15+10 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø8.8									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
17,88	17,12	17,88	2,67	10,00	10,00	7,91	3,07	1,91	620,67
									Quantia Fibres kg/m²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									5,33
									Quantia Total acer kg/m²
									30,16

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 10+15+10 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø10.10									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
18,05	16,95	18,05	5,27	10,00	10,00	10,96	4,20	1,91	620,67
									Quantia Fibres kg/m²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									8,27
									Quantia Total acer kg/m²
									33,09

FORJAT SANDVITX 5+20+10 (35cm):

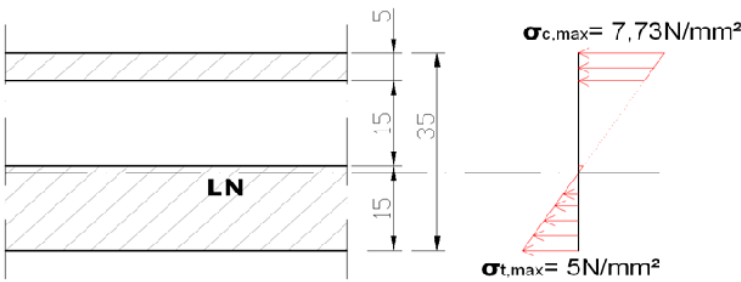
TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+20+10 (35cm)									
SITUACIÓ DE SERVEI (CÀLCUL ELÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	I _{estàtic} (cm ⁴)	W _{x(inf)} (cm ³)	W _{x(sup)} (cm ³)	M _{estàtic} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm ²)	σ _{trac.} (KN/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
20,83	14,17	20,83	261.458,33	18.455,88	12.550,00	9,23	7,35	5,00	535,90
									Quantia Fibres kg/m ²
									21,44
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									21,44

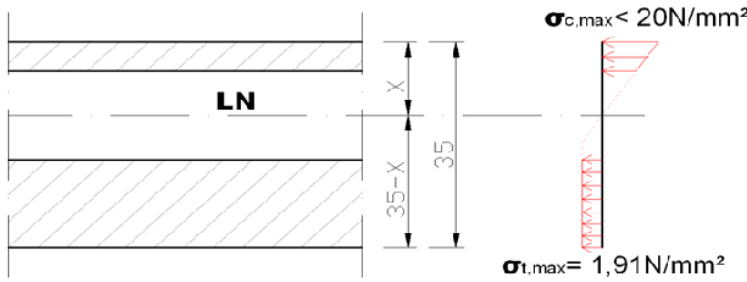
TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+20+10 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acer} (cm ²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm ²)	σ _{trac.} (KN/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
13,75	21,25	13,75	0,00	5,00	10,00	5,25	3,82	1,91	535,90
									Quantia Fibres kg/m ²
									21,44
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									21,44

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+20+10 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø8.8									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
16,63	18,37	16,63	2,67	5,00	10,00	8,67	6,14	1,91	535,90
									Quantia Fibres kg/m²
									21,44
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									5,33
									Quantia Total acer kg/m²
									26,77

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+20+10 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø10.10									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
16,80	18,20	16,80	5,27	5,00	10,00	12,01	8,40	1,91	535,90
									Quantia Fibres kg/m²
									21,44
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									8,27
									Quantia Total acer kg/m²
									29,70

FORJAT SANDVITX 5+15+15 (35cm):

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+15+15 (35cm)									
SITUACIÓ DE SERVEI (CÀLCUL ELÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	I _{elàstica} (cm ⁴)	W _{el} (inf) (cm ³)	W _{el} (sup) (cm ³)	M _{elàstica} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm ²)	σ _{trac.} (KN/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
21,25	13,75	21,25	263.541,67	19.166,67	12.401,96	9,58	7,73	5,00	620,67
									Quantia Fibres kg/m ²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									24,83

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+15+15 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA									
									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acer} (cm ²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm ²)	σ _{trac.} (KN/mm ²)	Pes Propi kg/m ²
12,50	22,50	12,50	0,00	5,00	15,00	7,16	5,73	1,91	620,67
									Quantia Fibres kg/m ²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m ²
									0,00
									Quantia Total acer kg/m ²
									24,83

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+15+15 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø8.8									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
15,65	19,35	15,65	2,67	5,00	15,00	10,58	8,05	1,91	620,67
									Quantia Fibres kg/m²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									5,33
									Quantia Total acer kg/m²
									30,16

TIPUS DE FORJAT									
SANDVITX 5+15+15 (35cm)									
SITUACIÓ LÍMIT ÚLTIMA (CÀLCUL PLÀSTIC) HRFA + #15x15cm Ø10.10									
Posició LN (x)	d _{inf} (cm)	d _{sup} (cm)	A _{acero} (cm²)	h _{1,comp.} (cm)	h _{2,tracció} (cm)	M _{residual} (Tm/ml)	σ _{comp.} (KN/mm²)	σ _{trac.} (KN/mm²)	Pes Propi kg/m²
16,00	19,00	16,00	5,27	5,00	15,00	13,92	10,31	1,91	620,67
									Quantia Fibres kg/m²
									24,83
									Quantia Arm. Pasiva C. kg/m²
									8,27
									Quantia Total acer kg/m²
									33,09

QUADRE RESUM:

	QUADRE RESUM							
	LLOSA 30cm				LLOSA 35cm			
	ELÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø8.8	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø10.10	ELÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø8.8	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø10.10
PES PROPI (Kg/m²)	750,00	750,00	750,00	750,00	875,00	875,00	875,00	875,00
QUANTIA (kg/m²)	30,00	30,00	35,33	38,27	35,00	35,00	40,33	43,27
M _{max} (Tm/ml)	7,50	7,84	12,17	16,26	10,21	10,68	15,79	20,65

	SANDVITX 10+15+10 (35cm)			
	ELÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø8.8	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø10.10
PES PROPI (Kg/m²)	620,67	620,67	620,67	620,67
QUANTIA (kg/m²)	24,83	24,83	30,16	33,09
M _{max} (Tm/ml)	9,40	4,78	7,91	10,96
M _{min} (Tm/ml)	9,40	4,78	7,91	10,96

	SANDVITX 5+20+10 (35cm)				SANDVITX 5+15+15 (35cm)			
	ELÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø8.8	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø10.10	ELÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø8.8	PLÀSTIC HRFA + #15x15cm Ø10.10
PES PROPI (Kg/m²)	535,90	535,90	535,90	535,90	620,67	620,67	620,67	620,67
QUANTIA (kg/m²)	21,44	21,44	26,77	29,70	24,83	24,83	30,16	33,09
M _{max} (Tm/ml)	9,23	5,25	8,67	12,01	9,58	7,16	10,58	13,92
M _{min} (Tm/ml)	6,28	2,63	6,29	9,62	6,20	2,39	5,23	8,00

-INTERPRETACIÓ DE RESULTATS:

En línies generals es pot apreciar com el canvi de tipologia de forjat de llosa a sandvitx condueix a l'optimització de l'ús del material donat que per a capacitats resistents equivalents entre llosa i forjat sandvitx, el pes propi del forjat (i consegüentment el volum de FRFA utilitzat) i la quantia d'acer (fibres + APC) es redueixen, tenint present també que la diferència de pes entre llosa i sandvitx es tradueix en un increment de capacitat portant de sobrecarregues. Aquesta reducció de pes, a part de repercutir directament sobre el forjats, també repercuteix sobre els elements de suport i fonamentació.

Un aspecte important a destacar entre la llosa massissa i el forjat sandvitx, en relació a la capacitat resistent, és la reducció del moment residual (només amb FRFA) calculat en regim plàstic, en situació límit última (aplicant coeficients de seguretat), respecte al moment calculat en regim elàstic, en situació de servei (sense coeficients de seguretat). Mentre que en llosa massissa el moment residual és lleugerament superior al moment calculat en regim elàstic, al forjat sandvitx, el moment residual calculat en regim plàstic és clarament inferior al moment calculat en regim elàstic. Aquesta diferència és més acusada en quant més prima és la capa traccionada del forjat sandvitx, a menys FRFA a la capa de tracció més diferència entre la capacitat resistent en regim elàstic i regim plàstic. Aquesta diferència es pot corregir amb la col·locació d'armadura passiva convencional en la capa traccionada, per tal d'augmentar el moment residual.

La secció del forjat sandvitx asimètrica, amb més secció de HRFA a la zona traccionada que a la zona comprimida, fa que la capacitat resistent augmenti, en contraposició, donat que la inversió de

la secció de forjat sandvitx és difícilment assumible per el procés constructiu, fa que aquesta millora de rendiment es converteixi en una disminució de capacitat resistent quan el moment passa tenir signe contrari.

Les zones que necessitin ser massisses en un forjat sandvitx, com pot ser els àbacs de pilars per suportar esforços de punxonament o tallant veuran augmentada la seva capacitat resistent, fet beneficiós donat que a les zones de suport és on els moments tenen valors màxims.

5.2 VIABILITAT DE L'ESTUDI. DESCRIPCIÓ DE LES FONTS A UTILITZAR.

Les hipòtesis de treball adoptades en aquest estudi han sigut extretes de les consideracions, conclusions, obtenció de resultats i metodologia de càlcul dels dos casos exposats d'aplicació de FRFA en forjats, corresponent a la SEU de LKS de la tesis doctoral de Aitor Maturana i l'assaig realitzat per TREFILARBED. Aquest dos casos utilitzen la tipologia de llosa massissa per als forjats, fent servir assajos sobre provetes per tal de determinar les resistències de càlcul per al FRFA, orientats en la seva aplicació a seccions massisses de formigó armat. A falta d'assajos per obtenció de tensions de càlcul per aplicacions en seccions alleugerides s'han pres com a valors de referència els obtinguts als dos casos exposats en aquest estudi. Per aquest motiu, serà necessari, en primera instància, contrastar les resistències de càlcul admissibles per a forjats tipus sandvitx amb els pertinents assajos.

Per altra banda, un dels principals avantatges de forjats amb llosa massissa de FRFA és la seva gran ductilitat amb resistències residuals importants després de la formació de ròtules plàstiques, que permet aplicar un càlcul plàstic mitjançant hipòtesis de línies de trencament. Aquesta metodologia de càlcul, encara que actualment està en desús, està bastant documentada en aplicació a lloses massisses. S'haurà d'estudiar la viabilitat de l'aplicació d'aquest tipus de càlcul en forjats sandvitx combinats amb zones massisses, especialment estudiant el càlcul de forjats continus recolzats sobre suports puntuals.

6. CONCLUSIONS PRELIMINARS.

6.1 VERIFICACIÓ DE L'OBJECTIU.

Segons les seccions analitzades, analíticament, a tensions normals sota esforços flectors, l'aplicació de FRFA en tipologia de forjat Sandvitx és viable tècnicament, aportant millores en l'optimització del material. No obstant, la pèrdua de resistència residual en comparació amb la capacitat resistent en regim elàstic fa necessari el reforç de la secció mitjançant armadura passiva convencional, per la qual cosa la aplicació de FRFA en forjats sandvitx haurà d'estar complementada per APC per tal d'augmentar la resistència residual de la secció.

6.2 CONCLUSIONS INTUÏDES.

- 1- L'aplicació de HFRA en forjats sandvitx convencional pot millorar el rendiment del material per a llums mitjanes on els gruixos de llosa massissa necessaris comencin a ser importants. No obstant, la secció s'hauria de reforçar combinant el FRFA amb armadura passiva convencional per tal d'augmentar la resistència residual.
- 2- La secció optima del forjat per a esforços flectors té forma asimètrica, concentrant més formigó en la capa traccionada que en la capa comprimida, però aquest avantatge es torna un inconvenient quant el moment flector canvia de signe, donat que en el procés constructiu convencional d'un forjat sandvitx no es pot invertir la secció del forjat. Per aquest motiu la secció del forjat sandvitx haurà de ser simètrica per tal de tenir la mateixa capacitat resistent en zona de moments positius que negatius a costa de baixar el rendiment del material (menys optimització) o s'haurà d'estudiar la manera d'aplicar seccions diferents compatibles amb el procés constructiu, encara que aquesta solució pugui suposar un increment de la complicació de l'execució.
- 3- El comportament de la secció en estat de servei (regim de càlcul elàstic) millora amb l'aplicació del forjat sandvitx en front de la llosa massissa, no obstant en estat últim (en regim de càlcul plàstic) el moment residual de la secció només amb FRFA es redueix significativament respecte a la llosa massissa. No obstant la resistència residual del forjat es pot augmentar si el FRFA es combina amb armadura passiva convencional.
- 4- El gran avantatge del FRFA aplicat en lloses massisses, amb una secció uniforme i amb la mateixa capacitat resistent residual en qualsevol punt, és que permet el càlcul plàstic per formació de ròtules lineals, la qual cosa permet una redistribució d'esforços per tal d'aprofitar al màxim la capacitat resistent del forjat. En el cas del forjat sandvitx, la secció alleugerida haurà de combinar-se amb zones massisses, com pot ser els àbacs dels elements de suport. El moment residual resistent residual de la secció tipus sandvitx es pot igualar amb el de la secció massissa mitjançant APC, mantenint la premissa de disposar d'una capacitat resistent residual en qualsevol punt del forjat per tal de poder aplicar un càlcul plàstic mitjançant la formació de ròtules lineals (línies de trencament).

- 5- Per tal de poder fer una aplicació real de HRFA en un forjat sandvitx, abans s'haurà d'estudiar el comportament del forjat a altres esforços que poden comprometre la integritat de l'estructura, com és el tallant als nervis i l'absorció de l'esforç rasant entre la junta de formigonat.

7. BIBLIOGRAFIA PRELIMINAR.

7.1 BIBLIOGRAFIA GENERAL.

CALAVERA RUIZ, J. (1.999), Proyecto de cálculo de Estructuras de hormigón, tomoll. Ed. INFOPRINT, S.A.

JIMÉNEZ MONTOYA, P., GARCÍA MESEGUER, A., MORÁN CABRÉ, F. (2.004) Hormigón armado, 14ª edición basada en la EHE. Editorial Gustavo Gili S.A.

EHE 2008 (2.008) Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de fomento.

MARISTANY CARRERAS, J. (1.993) Cálculo en rotura de losas fungiformes. Edicions UPC.

BRUFAU i NIUBÓ, R. (2.004) Els sostres sandvitx alleugerits amb bloc d'EPS. Quaderns d'estructures Núm. 14, pàg, 4-21.

7.2 BIBLIOGRAFIA ESPECIFICA.

7.2.1 NORMATIVES.

EHE 2008, ANEJO 14 (2.008) Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras. Ministerio de fomento.

ACI 544.2 R (1.988) Measurement of properties of fiber reinforced concrete. ACI MATERIALS, p. 583-593.

DBV (1.992) Technologie des Stahlfaser-betons und Stahlfaser-pritzbetons, Deutsche Beton Vereins.

CNR-DT 204 (2.006) Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture Fibrorinforzato, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

FIB MODEL CODE 2007(2.007) Fibre Reinforced Concrete, Draft version.

7.2.2 ARTICLES

RODRIGUEZ LÓPEZ, F., PRADO PÉREZ-SEONE, D.(1.984) Hormigón con la incorporación de fibras. Revista de obras públicas, octubre 1984, pàg. 779-796.

RILEM TC 162-TDF (2.003) Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Material and structures. Vol. 36, october 2003, pàg. 560-567.

BARROS, J., CUNHA, V., RIBEIRO, A. ANTUNES, J. (2.005) Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. Rilem, Materials and Structures 38 (february 2005) pàg. 47-56.

AGUADO, A. LARANJERIA, F., MOLINS, C. (2.008) Comportamiento a tracción de hormigones reforzados con fibras de acero.

AGUADO, A. CARMONA, S., MOLINS, C., CABRERA, M (2.009) Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona). Revista ingenieria de la construcción Vol. 24, nº 2, agosto 2009.

CARMONA, S. CABRERA, C. (2.009) Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero.). Revista ingenieria de la construcción Vol. 24, nº 1, abril 2009.

ZERBINO, R., GETTU, R., AGULLÓ, L., AGUADO, A. (2.003) Criterios y alternativas para la evaluación de la tenacidad en hormigones con fibras de acero. Revista de obras públicas. Agosto 2003, nº 3.435 pàg. 23-30.

ARCELOR BISSEN S.A. (2007) Developmen of steel fibre reinforced concrete flat slabs. Aachen University of Applied Sciencies, may 2007.

BLANCO ALVAREZ, A. PUJADAS ALVAREZ, P., De la FUETE ANTEQUERA, A., AGUADO de CEA, A. (2.010) Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras. Hormigón y acero. Volumen 61, nº 256, junio 2010 pàg. 83-101.

7.2.3 TESIS DOCTORALS I TREBALLS DE RECERCA

ARANGO CAMPO, S. (2.010) Fluencia a flexión del hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) en estado fisurado. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

MATURANA, A. (2.011) Edificio para sede LKS en Mondragón, Capítulos 3 y 4 de la tesis.

LARANJERIA de OLIVEIRA, F. (2.010) Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete. Tesis doctoral. Universitat politècnica de Catalunya.

COTO ROQUET, L. A. (2.007) Ecuaciones constitutivas para el análisis de secciones de HRFA. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

VICENTE NAVARRO, J. (2.009) La evolución de los forjados de edificación hacia unas técnicas más competitivas económicamente. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

CAMOS ANDREU, C. (2.009) Determinació del coeficient parcial de seguretat a aplicar al formigó reforçat amb fibres d'acer sotmès a tracció. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

UMBERT FEBRER, M. (2.010) Formigó reforçat amb fibres. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya.

DIEZ GUTIERREZ, C. (2.010) Estudio de viabilidad de utilización de fibras de acero como alternativa a los refuerzos convencionales en hormigones para construcción. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

BLASQUEZ BISBE, X. (2.009) Caracterització experimental de l'arrencament de fibres d'acer en provetes de formigó. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

MARMOL SALAZAR, P. (2.010) Hormigones con fibras de acero, características mecánicas. Tesina, Universidad politècnica de Madrid.

GONZALEZ RICART, J., LAPORTA VARA, A., TIO BARRERA, C., (2.001) Sustitución total o parcial de armadura pasiva por hormigones con fibras en hormigones estructurales. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 1 (2.002).

MAZO INFANTE, R., CASANOVAS MARTIN, P. (2.003) Factores principales para la elección de fibras para hormigones estructurales. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 3 (2.004).

APONTE HERNANDEZ, D., MORA APABLAZA, F. (2.003) Análisis estructural de las fibras embebidas en el hormigón. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 3 (2.004).

MARTINEZ ASENSIO, S., TEJERO GARCIA, A. (2.003) La influencia de las fibras en los modelos estructurales. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 3 (2.004).

GUINDA RIBERO, J., NEVES FERREIRA MENDES, V., RUIZ de GORDEJUELA SOLER, G. (2.003) Análisis de validez del ensayo de doble punzonamiento para el hormigón con fibras. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 3 (2.004).

AMETLLER MALFAZ, X., USACH MUÑOZ, J. (2.004) Análisis del ensayo de doble punzonamiento en el hormigón con fibras. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 4 (2.005).

BUSQUETS ZAPATA, M., PAUSAS ESCOLA, J. (2.005) El hormigón autocompactable y su aplicación con fibras. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 5 (2.006).

FARRES PICAÑOL, J., SERRAT GENESCA, M. (2.006) Ensayo de placa para la evaluación de la tenacidad del hormigón proyectado con fibras: Revisión crítica de las técnicas de ensayo. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 6 (2.007).

BELTRAN RODAT, G., ILLA CAMOS, J. (2.006) Durabilidad del hormigón con fibras. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 6 (2.007).

YUBERO CAMBRA, E., de PABLO HORTIGÜELA, R. (2.006) Orientación de fibras en hormigón autocompactable. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 6 (2.007).

LARANJEIRA, F. (2.006) Constitutive equations of fiber reinforced concrete. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 6 (2.007).

GOMEZ, E., RIERA, M. (2.006) Las fibras plásticas como refuerzo del hormigón. Situación actual y perspectivas de uso. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 6 (2.007).

MONTES BARBOSA, B., BONO GODOY, V. (2.008) Aplicaciones estructurales de Hormigón con fibras. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 8 (2.009).

HIDALGO RABASEDA, G., PLAZA GALLART, R. (2.008) Factores principales para la elección de fibras para hormigones estructurales. Treball de recerca, Universitat politècnica de Catalunya. Anales de construcciones y materiales avanzados- Vol 8 (2.009).

VALLS VIDAL, R. (2.009) Disseny, caracterització i aplicació d'un formigó de molt altes prestacions reforçat amb fibres per a un plafó prefabricat. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

GUARDIA TOMAS, J. (2.007) Caracterització del comportament a tracció de formigó d'alta treballabilitat reforçat amb fibres d'acer mitjançant l'assaig Barcelona. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

De la FUENTE ANTEQUERA, A. (2.007) Análisis no lineal y comportamiento en servicio y rotura de secciones construidas evolutivamente sometidas a flexocompresión recta. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

MARTINEZ ESCAMILLA, M. (2.010) Análisis en rotura de placas de hormigón reforzado con fibras de acero. Tesina, Universitat politècnica de Catalunya.

7.2.4 ALTRES (pàgines web, conferències, congressos...)

AGUADO, A. (2.006) Tendencias en los hormigones con fibras. 1º Congreso consultores de estructuras.

AGUADO, A. (2.007) Presentación del anejo de hormigón con fibras de la EHE. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

SERNA, P. (2.007) Recientes ejemplos estructurales de aplicación de hormigón de fibras. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

BARRAGAN, B. (2.007) Orientación y distribución de fibras de acero en hormigones autocompactantes. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

MOLINS, C. (2.007) Distribución y orientación de las fibras en dovelas fabricadas en horizontal. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

TORRENTS, J. (2.007) Control de calidad del hormigón con fibras. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

De la FUENTE, A., ARMENGOU, J. (2.007) Aplicaciones estructurales del HRF: tubos de saneamiento, paneles de cerramiento y placas de suelo reforzado. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

LAMBRECHTS, A., VITT, G. (2.007) Anchura de fisura y durabilidad estructural. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

Di PRISCO, M. (2.007) FRC Structural Applications in Italy. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

WALRAVEN, J. (2.007) Fibre reinforced concrete: a material in development. Jornada Técnica, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Octubre 2007).

WWW.TREFILARBED.COM

AGUADO, A. (2.010) Formigó armat amb fibres metàl·liques: disseny, càlcul i aplicació. Ponència, aplicaciones estructurales de hormigón con fibras (Febrero 2010).

GODOY, M., NEMI, N., ROCCO, C. (2.007) Comportamiento mecánico de hormigón reforzado con fibras de acero: influencia de la dosificación de fibras. Jornada Técnica, Congreso SAM/CONAMET 2007.

GUTIERREZ JIMENEZ, J., MORAN CABRE, F. (2.010) Métodos aproximados de cálculo de secciones de hormigones reforzados con fibras (HRF). Ponencia, Congreso de ACHE.

AGUADO, A. (2.007) Tendencias del hormigón con fibras en construcciones subterráneas. Ponència, Jornada sobre avances en tecnología del hormigón en construcción subterránea.